

# ANÁLISIS DINÁMICO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE PÓRTICOS METÁLICOS A ESCALA REDUCIDA

Trabajo realizado por:

**Gian Carlo Vitale Chiappini**

Dirigido por:

**Dr. Rolando Chacón Flores**

Barcelona, Mayo 2018

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**

# **ANÁLISIS DINÁMICO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE PÓRTICOS METÁLICOS A ESCALA REDUCIDA**

Autor

**GIAN CARLO VITALE CHIAPPINI**

Tutor:

**DR. ROLANDO CHACÓN FLORES**

Universitat Politècnica de Catalunya  
Enginyeria Civil i Ambiental

Barcelona, Mayo 2018

## Resumen

En este documento se plantea y describe el uso de herramientas de código abierto y bajo coste en el campo de la dinámica estructural. Con este objetivo, se instrumentan dos pórticos metálicos a escala. Se realizan tanto análisis experimentales como numéricos, contrastando los resultados para validar las repuestas obtenidas. En cuanto a la fase experimental, se realizan cuatro tipos de ensayos: i) Vibración Libre ii) Vibración forzada iii) Vibración forzada armónica iv) Barrido de frecuencias. Los ensayos i, iii y iv se realizan a la primera estructura de geometría más sencilla y de escala más reducida, mientras que los ensayos i y ii son realizados en la segunda estructura, de mayor escala y complejidad. Las respuestas a estos ensayos se miden utilizando un microcontrolador Arduino DUE y dos tipos de acelerómetro, uno digital (ADXL 345), usando i2c como protocolo de envío de datos, y uno analógico (ADXL 335). Por otra parte, a los respectivos modelos digitales se le realizan tres tipos de análisis: i) un análisis de frecuencias, para determinar las frecuencias naturales de los modos de vibración ii) un análisis modal dinámico, para determinar las repuestas de la estructuras frente a las diferentes acciones en la base iii) un análisis de repuesta en el dominio de la frecuencia. Los resultados de ambos métodos son contrastados, obteniendo resultados con aproximaciones que pueden considerarse favorables dando un paso más para la utilización de redes de monitorización con equipos de fuente abierta y bajo coste.

## Abstract

This document describes the use of open source and low cost equipment in the structural dynamic field. With this objective, two metallic frames are set up to scale. Experimental and numeric analyses are performed on the structures, comparing the solutions of both methods to validate the results. Four analysis types are performed in the experimental phase: i) Free vibration ii) Forced vibration iii) Forced harmonic vibration iv) Frequency sweep. Analyses i, iii and iv are performed on the structure with simpler geometrics and smaller scale, while analyses i and ii are performed on the second more complex and bigger structure. The results of these experiments are measured by an Arduino DUE microcontroller and two types of accelerometers, one digital (ADXL 345) using an i2c protocol communication and one analog (ADXL 335). On the other hand, three analysis types are performed on the digital numeric model: i) frequency analysis to determine the natural frequencies of the vibration modes ii) dynamic modal analysis, to determine the response of the structures to different actions to the base iii) Steady-state analysis to determine the response of structure on the frequency domain. The results of both methods are compared obtaining the necessary approximations that can be considered favorable towards the more common use of monitoring networks utilizing open source and low cost equipment.

## Resum

En Aquest document es planteja i descriu l'ús d'eines de codi obert i de baix cost en el camp de la dinàmica estructural. Amb aquest objectiu, s'instrumenten dos pòrtics metàl·lics a escala. És realitzen tanta anàlisi experimentals com numèrics, contrastant els resultats per a validar les respostes obtingudes. Pel que fa a la fase experimental, es realitzen quatre tipus d'assajos: I) vibració lliure; II) Vibració forçada; III) vibració forçada harmònica; IV) estudi segons freqüència. Els assajos I, III i IV es realitzen a la primera estructura de la geometria més senzilla i d'escala més reduïda, mentre que els assajos I i II estan realitzats a la segona estructura de major escala i complexitat. Les respostes a aquests assaigs és mesuren utilitzant un microcontrolador Arduino DUE i dos tipus d'acceleròmetre, un digital (ADXL 345) que utilitza i2c com a protocol d'enviament de dades, i un analògic (ADXL 335). Per altra banda, als respectius models digitals se li fan tres tipus d'anàlisi: I) una anàlisi de freqüències modal dinàmic, per a determinar la freqüència natural dels modes de vibració II) una anàlisi modal dinàmic, per a determinar la resposta de l'estructura enfront a les diferents accions a la base; III) una anàlisi de resposta al domini de la freqüència. Els resultats d'ambdós mètodes contrastats s'obtenen resultats amb aproximacions que poden considerar-se favorables donant un pas més per a la utilització de xarxes de monitoratge amb equips de font oberta i baix cost.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Objetivos y metodología .....	2
1.2.1. Objetivo principal y secundario.....	2
1.3. Objetivos específicos.....	2
1.4. Metodología .....	3
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	4
2.1. Conceptos de dinámica .....	4
2.1.1. Sistemas de un grado de libertad.....	4
2.1.1.1. Vibración libre no amortiguada: .....	4
2.1.1.2. Vibración libre amortiguada: .....	5
2.1.1.3. Vibración forzada no amortiguada .....	7
2.1.1.4. Vibración forzada amortiguada.....	8
2.1.2. Sistemas de varios grados de libertad: .....	9
2.1.2.1. Frecuencias naturales y modos de vibración .....	11
2.1.3. Análisis modal .....	12
2.1.4. Análisis en el dominio de la frecuencia .....	12
2.2. Microcontroladores. Software y Hardware .....	14
2.2.1. Hardware.....	14
2.2.2. Convertidor Analógico Digital .....	15
2.2.3. Software .....	15
2.2.3.1. Estructura .....	15
2.2.3.2. Valores.....	16
2.2.3.3. Funciones .....	17
2.2.3.4. Funciones básicas.....	18
2.3. Acelerómetros.....	18
2.3.1. Digital vs analógico.....	20
3. MODELO EXPERIMENTAL .....	21
3.1. Introducción .....	21
3.2. Descripción de las estructuras ensayadas.....	23
3.2.1. Estructura 1 .....	23
3.2.1.1. Pilares .....	23

3.2.1.2. Forjados:.....	24
3.2.1.3. Base: .....	24
3.2.1.4. Masa adicional en el forjado superior.....	25
3.2.1.5. Ensamblaje del modelo:.....	26
3.2.2. Estructura 2 .....	26
3.2.2.1. Pilares .....	27
3.2.2.2. Vigas .....	27
3.2.2.3. Base .....	28
3.2.2.4. Masas adicionales .....	29
3.3. Descripción de los equipos.....	29
3.3.1. Sistema de adquisición de datos .....	30
3.3.1.1. Muestreo .....	30
3.3.1.2. Resolución .....	34
3.3.2. ADXL335 .....	37
3.3.2.1. Código: .....	37
3.3.2.2. Conexión: .....	38
3.3.2.3. Calibración:.....	38
3.3.3. ADXL345 .....	42
3.3.3.1. Código: .....	43
3.3.3.2. Conexión: .....	48
3.3.3.3. Calibración:.....	48
3.3.4. Generador de movimientos en la base .....	51
3.4. Plan de ensayo .....	53
3.4.1. Ensayo de vibración libre Estructura 1.....	53
3.4.2. Ensayo vibración libre Estructura 2.....	58
3.4.3. Ensayo de vibración forzada Estructura 1.....	62
3.4.4. Ensayo de vibración forzada Estructura 2.....	65
3.4.5. Ensayo de barrido de frecuencias Estructura 1.....	66
4. MODELO NUMÉRICO.....	69
4.1. Introducción .....	69
4.2. Caracterización del modelo Estructura 1- Preproceso.....	69
4.2.1. Elementos.....	70
4.2.1.1. Elemento tipo Viga:.....	70
4.2.1.2. Elementos tipo Placa .....	71
4.2.2. Condiciones de contorno .....	72

4.3. Análisis dinámico – Estructura 1 .....	72
4.3.1. Análisis de frecuencias modales .....	72
4.3.2. Obtención de resultados - Postproceso .....	73
4.3.3. Análisis modal dinámico.....	74
4.3.3.1. Procedimiento .....	75
4.3.3.2. Obtención de resultados – Postproceso .....	75
4.3.4. Análisis del régimen estacionario.....	77
4.3.4.1. Obtención de resultados – Postproceso .....	79
4.4. Caracterización del modelo Estructura 2- Preproceso.....	81
4.4.1. Elementos.....	81
4.4.1.1. Elementos tipo Placa .....	81
4.4.2. Condiciones de contorno .....	82
4.5. Análisis dinámico – Estructura 2 .....	82
4.5.1. Análisis de frecuencias modales .....	83
4.5.2. Obtención de resultados - Postproceso .....	83
4.5.3. Análisis modal dinámico.....	85
4.5.3.1. Procedimiento .....	85
4.5.3.2. Obtención de resultados – Postproceso .....	86
4.5.4. Análisis en estado estable .....	87
4.5.4.1. Obtención de resultados – Postproceso .....	88
5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS. ....	91
5.1. Análisis de frecuencias propias .....	91
5.2. Análisis modal y espectros de repuesta de aceleración.....	92
5.3. Análisis en régimen estacionario vs Barrido de frecuencias. ....	95
5.4. Análisis en régimen estacionario vs Repuesta en el dominio de la frecuencia.....	98
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN .....	100
6.1. Conclusiones referentes al microcontrolador y a los sensores de bajo coste como instrumentos de investigación. ....	100
6.2. Conclusiones referentes a la modelización numérica.....	101
6.3. Conclusiones referentes a las estructuras ensayadas.....	101
6.4. Recomendaciones .....	101
6.5. Futuras líneas de investigación .....	102
7. Referencias.....	103



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de un grado de libertad. (Chopra 2014) .....	4
Figura 2. Vibración libre de un sistema sobreamortiguado, críticamente amortiguado y subamortiguado. (Chopra 2014) .....	6
Figura 3. Amortiguamiento en vibración libre. (Chopra 2014) .....	6
Figura 4. Esquema de edificio de cortante. Donde las masas están concentradas y los pilares solo aportan rigidez. (Clough, 1995) .....	9
Figura 5. Esquema de edificio de cortante sometido a una fuerza $P_i$ y las fuerzas que actúan sobre una masa cualquiera (Clough, 1995) .....	10
Figura 6. Comparación espectro en dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. ....	14
Figura 7. Placa Arduino DUE.....	15
Figura 8. Estructura típica de una función en C/C++.....	17
Figura 9. Estructura de un acelerómetro MEMS típico.....	19
Figura 10. Estructura 1. ....	22
Figura 11 Estructura 2 .....	22
Figura 12. Varillas roscadas y uniones con forjados.....	23
Figura 13. Base de la Estructura 1 (sin actuador).....	25
Figura 14. Pesaje de las masas adosas al último forjado. ....	25
Figura 15. Ensamblaje de los cilindros. ....	26
Figura 16. Esquema estructural de la Estructura 2. ....	27
Figura 17. Ensamblaje Estructura 2.....	28
Figura 18. CNC Sinumerik 805 Software versión 2 y base móvil con la Estructura 2.....	29
Figura 19. Masas Adicionales Estructura 2.....	29
Figura 20. Código ensayo de velocidad de muestreo. ....	31
Figura 21. Resultados Velocidad de Muestreo.....	31
Figura 22. Cuadro comparativo de datos perdidos vs delay .....	34
Figura 23. Código ensayo de resolución Arduino Due. ....	35
Figura 24. Esquema de conexión para ensayo de resolución. ....	36
Figura 25. Resultados ensayo de resolución. ....	36
Figura 26. Código de lectura simple ADXL 335.....	38
Figura 27. Esquema de conexión ADXL 335 .....	38
Figura 28. Código para calibración ADXL 335.....	39
Figura 29. Esquema de conexión para calibración del ADXL 335.....	40
Figura 30. Direcciones de los ejes para calibración del sensor. ....	41
Figura 31. Diagrama de comunicación del dispositivo mediante protocolo I2C.....	43
Figura 32. Mapa de registro del ADXL 345 .....	44
Figura 33. Código de lectura sin librerías del ADXL 345. A) definición de la función “escribir” en el dispositivo. B) definición de la función “leer” desde el dispositivo. ....	46
Figura 34. Código de lectura usando librerías para el ADXL 345. ....	47
Figura 35. Esquema de conexión del ADXL 345 usando I2C.....	48
Figura 36. Código para Calibración del ADXL 345 .....	49
Figura 37. Imagen referencial del generador de barrido 1200A.....	51
Figura 38. Amplificador de señal.....	51
Figura 39. Tambor electromecánico de la marca Bruel Kjaer. ....	52
Figura 40. Plan de ensayos para las estructuras 1 y 2.....	53
Figura 41. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 335 a 10 datos por segundo.....	54

Figura 42. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 335 a 20 datos por segundo. ....	54
Figura 43. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 335 a 50 datos por segundo. ....	54
Figura 44. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 335 a 550 datos por segundo. ....	54
Figura 45. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 345 a 10 datos por segundo. ....	55
Figura 46. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 345 a 50 datos por segundo. ....	55
Figura 47. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 345 a 500 datos por segundo. ....	55
Figura 48. Espectro de frecuencia para las diferentes velocidades de muestreo (DPS) usando el ADXL 335. ....	57
Figura 49. Espectro de frecuencia para las diferentes velocidades de muestreo (DPS) usando el ADXL 345. ....	57
Figura 50. Ensayo vibración libre 1: Dirección X, ADXL345. ....	59
Figura 51. Ensayo vibración libre 2: Dirección X, ADXL345. ....	59
Figura 52. Ensayo vibración libre 3: Dirección X, ADXL345. ....	59
Figura 53. Ensayo de vibración libre 4: Dirección X, ADXL335. ....	59
Figura 54. Ensayo de vibración libre 5: Dirección X, ADXL335. ....	59
Figura 55. Ensayo de vibración libre 6: Dirección X, ADXL335. ....	59
Figura 56. Ensayo de vibración libre 7: Dirección Y, ADXL345. ....	60
Figura 57. Ensayo de vibración libre 8: Dirección Y, ADXL345. ....	60
Figura 58. Ensayo de vibración libre 9: Dirección Y, ADXL345. ....	60
Figura 59. Ensayo de vibración libre 10: Dirección Y, ADXL335. ....	60
Figura 60. Ensayo de vibración libre 11: Dirección Y, ADXL335. ....	60
Figura 61. Ensayo de vibración libre 12: Dirección Y, ADXL335. ....	61
Figura 62. Espectro de frecuencia de la Estructura 2. ....	62
Figura 63. Historia de desplazamientos de la Estructura 1. ....	63
Figura 64. Historia de velocidades de la Estructura 1. ....	63
Figura 65. Historia de aceleraciones de la Estructura 1. (ADXL 345) ....	63
Figura 66. Historia de aceleraciones de la Estructura 1. (ADXL 335) ....	64
Figura 67. Respuesta de la Estructura 2 frente a la señal de Ruido blanco. ADXL 345. ....	65
Figura 68. Respuesta de la Estructura 2 frente a la señal de Ruido blanco. ADXL 335. ....	66
Figura 69. Respuesta de la Estructura 2 frente a la señal del sismo del centro. ADXL 345. ....	66
Figura 70. Respuesta de la Estructura 2 frente a la señal del sismo del centro. ADXL 335. ....	66
Figura 71. Resultado del barrido de frecuencias en la Estructura 1 usando el acelerómetro ADXL 335. ....	67
Figura 72. Resultado del barrido de frecuencias en la Estructura 1 usando el acelerómetro ADXL 345. ....	68
Figura 73. Deformada del primer modo de vibración. ....	73
Figura 74. Deformada del segundo modo de vibración. ....	73
Figura 75. Deformada del tercer modo de vibración. ....	74
Figura 76. Gráfico de aceleración aplicada en la base del modelo. ....	75
Figura 77. Respuesta de desplazamiento en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 1. ....	76
Figura 78. Respuesta de velocidad en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 1. ....	76
Figura 79. Respuesta de aceleración en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 1. ....	77
Figura 80. Parámetros para el “Steady-state analysis” ....	78
Figura 81. Función de aceleración definida como excitación de entrada para el modelo numérico de la Estructura 1. ....	78

Figura 82. Espectro de respuesta de desplazamiento en el dominio de la frecuencia de la Estructura 1. ....	79
Figura 83. Espectro de respuesta de velocidad en el dominio de la frecuencia de la Estructura 1. ....	80
Figura 84. Espectro de respuesta de aceleración en el dominio de la frecuencia de la Estructura 1. ....	80
Figura 85. Primer modo de vibración. ....	83
Figura 86. Segundo modo de vibración. ....	84
Figura 87. Tercer modo de vibración. ....	84
Figura 88. Gráfico de aceleración aplicada en la base del modelo (sismo del centro). ....	85
Figura 89. Respuesta de desplazamiento en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 2. ....	86
Figura 90. Respuesta de velocidad en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 2. ....	86
Figura 91. Respuesta de aceleración en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 2. ....	87
Figura 92. Parámetros para el “Steady-state analysis” ....	88
Figura 93. Función de aceleración definida como excitación de entrada para el modelo numérico de la Estructura 1. ....	88
Figura 94. Espectro de respuesta de desplazamiento en el dominio de la frecuencia de la Estructura 2. ....	89
Figura 95. Espectro de respuesta de velocidad en el dominio de la frecuencia de la Estructura 2. ....	89
Figura 96. Espectro de respuesta de aceleración en el dominio de la frecuencia de la Estructura 2. ....	90
Figura 97. Espectro de repuesta de aceleración numérico vs experimental Estructura 1 (con ADXL 345) ....	93
Figura 98. Espectro de repuesta de aceleración numérico vs experimental Estructura 1 (con ADXL 335) ....	93
Figura 99. Espectro de repuesta de aceleración numérica vs experimental Estructura 2 (ADXL 345). ....	94
Figura 100. Espectro de repuesta de aceleración numérica vs experimental Estructura 2 (ADXL 335). ....	94
Figura 101. Espectros de repuesta de aceleración experimental. ....	95
Figura 102. Espectro de frecuencia de la Estructura 2. ....	96
Figura 103. Resultado del barrido de frecuencias en la Estructura 1 usando el acelerómetro ADXL 335 ....	96
Figura 104. Espectro de respuesta de aceleración en el dominio de la frecuencia de la Estructura 1. ....	97
Figura 105. Espectro de aceleración en el dominio de la frecuencia (ADXL 345). ....	98
Figura 106. Espectro de aceleración en el dominio de la frecuencia (ADXL 335). ....	98

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del Metacrilato .....	24
Tabla 2. Datos de muestreo sin sensor. ....	33
Tabla 3. Datos de muestreo con ADXL 335. ....	33
Tabla 4. Datos de muestreo con ADXL 345. ....	33
Tabla 5. Valores de calibración del ADXL335 .....	41
Tabla 6. Valores de 1g, 0g y -1g del ADXL 335 .....	42
Tabla 7. Valores de calibración para el ADXL 345 .....	50
Tabla 8. Valores de 1g, 0g y -1g del ADXL 345 .....	50
Tabla 9. Tabla resumen de resultados de ensayo de vibración libre de la Estructura 1.....	54
Tabla 10. Amortiguamiento usando el ADXL 335 .....	56
Tabla 11. Amortiguamiento usando el ADXL 345 .....	56
Tabla 12. Valores de puntos de máxima amplitud.....	58
Tabla 13. Amortiguamiento Estructura 2.....	61
Tabla 14. Frecuencias naturales y amplitudes máximas.....	62
Tabla 15. Resumen de errores de aceleración, velocidad y posición esperados en función del error de orientación. ....	65
Tabla 16. Resultados del barrido de frecuencia dela Estructura 1 usando el ADXL 335.....	67
Tabla 17. Tabla de resultados del barrido de frecuencia dela Estructura 1 usando el ADXL 345 .....	68
Tabla 18. Sistema de unidades consistentes.....	70
Tabla 19. Propiedades de los pilares.....	71
Tabla 20. Propiedades de los fojrados. ....	72
Tabla 21. Resumen resultados del análisis de frecuencias. ....	74
Tabla 22. Valores máximos para el primer modo de vibración de la Estructura 1. ....	77
Tabla 23. Datos del barrido de frecuencias de la Estructura 1. ....	79
Tabla 24. Resumen Steady-state análisis .....	80
Tabla 25. Propiedades elementos de la Estructura 2.....	82
Tabla 26. Tabla resumen frecuencias naturales.....	84
Tabla 27. Valores máximos para el análisis modal de la Estructura 2.....	87
Tabla 28. Resumen Steady-state análisis .....	90
Tabla 29. Resumen frecuencias naturales Estructura 1. ....	91
Tabla 30. Resumen frecuencias naturales Estructura 2. ....	92
Tabla 31. Barrido de frecuencias s resultado numérico Estructura 1. ....	96

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Introducción

Los ensayos experimentales dinámicos pueden ser considerados fundamentales para caracterizar el comportamiento dinámico de las estructuras de ingeniería civil. La experimentación permite verificar determinadas situaciones de las estructuras y también permite la comparación de dos soluciones (Oller & Car, 1999) obtenidas de manera experimental y analítica.

La dinámica estructural es la rama de la ingeniería que estudia la respuesta de una estructura, ya sea edificación o cualquier obra civil, ante la acción de una carga dinámica, es decir, una carga variable en el tiempo. Donde la respuesta estática es solo una de las componentes de la respuesta total. La dinámica está ampliamente planteada y descrita en libros clásicos como (Chopra 2007 o Clough 2003, Paz 2003), y resulta importante para conocer el comportamiento de las estructuras frente a fenómenos como los sismos, el viento, en algunos casos vibraciones generadas por máquinas e incluso por las mismas personas. El análisis modal de vibraciones es una herramienta que se puede utilizar tanto a nivel global como local en las estructuras y puede servir de instrumento en la toma de decisiones en la gestión de las mismas (Consuegra y Santos 2015).

A pesar de que es bien conocida la dificultad de excitar estructuras reales para estimar propiedades modales como frecuencias naturales, desplazamientos, amortiguamiento y demás datos de interés, actualmente se cuenta con potentes programas que usan metodologías de elementos finitos o volúmenes finitos, como por ejemplo el usado en este documento, ABAQUS. Estos software nos permiten resolver con relativa sencillez y rapidez problemas enormemente complejos que hace algunos años eran desarrollados solo por especialistas y en casos muy importantes y específicos. Sin embargo, con el desarrollo de estos programas y la implementación de interfaces más amigables e intuitivas, son muchos los usuarios que sin el conocimiento adecuado sobre MEF (Métodos de elementos finitos) usan estos programas, lo que resulta en simulaciones, que G. R. Liu y S.S. Quek, describen como “Garbage IN, Garbage OUT”. El peligro radica en que estos archivos erróneos de salida comúnmente están detrás de animaciones, colores y gráficos llamativos que pueden guiar a peligrosas decisiones en el diseño estructural.

Y no solo se han creado software de cálculo más potentes y especializados, también se ha generado en años recientes un gran crecimiento en el campo de la electrónica. Lo que ha permitido que una gran cantidad de usuarios tengan acceso a placas con micro-controladores a bajo coste y fácil manejo. Marcas como Arduino y RaspberryPi, han impulsado el uso de sensores y componentes electrónicos que a muy bajos precios, además de crear una comunidad donde es posible acceder a una gran de información. Dicha accesibilidad, sumada a la difusión del conocimiento en abierto, pronostica grandes avances en el desarrollo de ingeniería experimental a bajo coste tanto a nivel industrial como educativo (Pearce 2012).

En un país donde la mayor parte de la inversión para la construcción está destinada al mantenimiento y restauración de estructuras existentes, donde hay un sinfín de edificaciones históricas y donde la mayor parte de sus edificaciones superan los 50 años, donde no siempre es posible realizar pruebas directas (destructivas) a sus materiales y elementos, es imprescindible contar con herramientas que nos ayuden a comprender la evolución de las estructuras durante su vida útil, entender como varían

las características fundamentales como su rigidez, amortiguamiento, frecuencias naturales etc., como y cuando deben ser reforzadas y así tener mejores modelos de predicción de coste y tiempo de vida útil.

En este documento se presenta el análisis dinámico experimental y numérico de dos estructuras metálicas simples instrumentadas con sensores y sistemas de adquisición de datos de bajo coste. Se plantea la obtención de las propiedades modales de manera experimental y numérica, contrastando los resultados para determinar la viabilidad y el alcance de las herramientas de código abierto y bajo coste en estudios experimentales de estructuras.

## 1.2. Objetivos y metodología

### 1.2.1. Objetivo principal y secundario

El objetivo principal de la presente tesis es estudiar y contrastar el comportamiento numérico y experimental de dos estructuras metálicas.

Para ello se han utilizado acelerómetros de bajo coste y un software de elementos finitos para el modelo numérico.

Como objetivo secundario se plantea establecer la fiabilidad en el uso de los sensores antes mencionados e implantar una lista de recomendaciones y observaciones para garantizar que los resultados arrojados por éstos sean lo más confiables y certeros posible.

### 1.3. Objetivos específicos

- Ensamblar e instrumentar un modelo a escala reducida.
- Desarrollar un modelo digital en el software ABAQUS del sistema físico con todas sus propiedades físicas y geométricas.
- Realizar un análisis de frecuencias, un análisis modal y un análisis steady-state
- Obtener y analizar los resultados experimentales de frecuencias utilizando un actuador mecánico para generar la forzante armónica.
- Comparar el modelo numérico en base a los resultados experimentales.
- Medir e instrumentar un segundo modelo de mayor escala.
- Determinar las variables que deben ser simuladas en el software.
- Desarrollar un modelo numérico en el software ABAQUS de este segundo modelo físico con todas sus propiedades físicas y geométricas.
- Realizar un análisis de frecuencias, un análisis modal y un análisis steady-state
- Obtener y analizar los resultados experimentales de frecuencias usando una mesa vibratoria para generar la forzante armónica
- Comparar el modelo numérico en base a los resultados experimentales.
- Analizar e interpretar todos los análisis.
- Presentar conclusiones y recomendaciones.

## 1.4. Metodología

La metodología adoptada para llevar a cabo los objetivos proyectados en esta tesis consta de las siguientes actividades:

- Ensayos experimentales de ambas estructuras usando instrumentación de código abierto y bajo coste.
- Análisis numéricos y modales con el método de elementos finitos utilizando el software Abaqus.
- Tratar los resultados superponiendo soluciones experimentales y numéricas.

## 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Se dice que una acción tiene un carácter dinámico si varía con el tiempo y da origen a las fuerzas de inercia en las estructuras. Todas las características de las cargas dinámicas (módulo, dirección, sentido, punto de aplicación), o sólo algunas de ellas, varían con el tiempo (Barbat & Canet, 1994)

Ante acciones que varían en el tiempo una estructura responde cambiando su posición de equilibrio estable. Estos cambios de posición pueden alcanzar grandes amplitudes incluso para valores pequeños de la fuerza excitadora, lo que puede generar la ruina parcial o total de una estructura.

A continuación se revisan algunos conceptos básicos del análisis dinámico estructural que serán las bases para los análisis de los modelos numéricos y para la interpretación y comparación de los resultados experimentales.

### 2.1. Conceptos de dinámica

#### 2.1.1. Sistemas de un grado de libertad

Los sistemas de un grado de libertad son los sistemas estructurales más sencillos y su importancia radica principalmente en que su sencillez permite explicar los conceptos básicos de la dinámica, además, usando análisis modal, pueden resolverse sistemas de “n” grados de libertad superponiendo “n” sistemas de 1 grado de libertad.

El sistema de 1 GDL (1 grado de libertad) se define como sistema de parámetros concentrados cuyo movimiento queda totalmente definido por 1 sola componente.

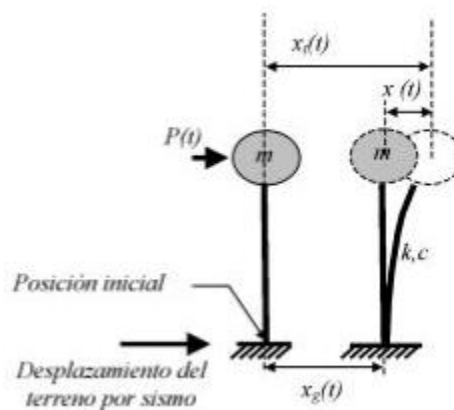


Figura 1. Sistema de un grado de libertad. (Chopra 2014)

##### 2.1.1.1. Vibración libre no amortiguada:

Se dice que una estructura experimenta vibración libre cuando existe una perturbación de su posición de equilibrio y se deja vibrar libremente sin ninguna excitación dinámica externa. La razón de decaimiento de esta vibración libre está controlada por la fracción de amortiguamiento crítico. Por lo que los resultados analíticos que describen la vibración libre proporcionan una base para determinar la frecuencia natural y la fracción de amortiguamiento crítico de una estructura a partir de resultados experimentales.



Para un sistema de 1 GDL sin amortiguamiento, si la masa se desplaza de su posición de equilibrio y se deja vibrar sin ninguna fuerza externa, esta oscilará alrededor de esta posición. Aislado la masa y planteando equilibrio se obtiene la ecuación:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (1)$$

La solución de la ecuación (1) para las condiciones iniciales:  $u = u(0)$  ;  $\dot{u} = \dot{u}(0)$  tiene la forma:

$$u(t) = u(0) \cos \omega_n t + \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t \quad (3) \quad ; \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

Donde  $\omega_n$  es la frecuencia natural del sistema y depende de las propiedades intrínsecas de la estructura y sus unidades son radianes por segundo. A partir de esta frecuencia es muy fácil conocer el periodo natural ( $T_n$ ) de la estructura (tiempo en que el sistema tarda en completar un ciclo) utilizando la ecuación (5), o la frecuencia natural de vibración ( $f_n$ ) (cantidad de ciclos por segundo) a través de la fórmula (6).

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (5)$$

$$f_n = \frac{1}{T_n} \quad (6)$$

#### 2.1.1.2. Vibración libre amortiguada:

Para poder describir este movimiento es necesario describir el fenómeno de amortiguamiento. De manera general el amortiguamiento es la disminución constante de la amplitud del movimiento oscilatorio de un sistema. En este fenómeno la energía se disipa a través de diversos mecanismos y, con frecuencia, existe más de un mecanismo actuando al mismo tiempo. En los sistemas la mayor parte de la disipación de energía es asociada al efecto térmico del esfuerzo elástico repetido de los componentes y de la fricción interna de los mismos. Sin embargo, en las estructuras reales son muchos más los mecanismos que contribuyen a la disipación de energía.

Es común en la dinámica estructural aproximar este amortiguamiento como un amortiguamiento viscoso, es decir, que la fuerza amortiguadora es proporcional a la velocidad.

$$F_a = C\dot{u}(t) \quad (7)$$

Donde la constante C es la fracción de amortiguamiento que produce la misma disipación de energía que la totalidad de mecanismos que actúan en la estructura.

Con esta nueva componente es posible entonces plantear la ecuación de movimiento para sistemas amortiguados en vibración libre.

$$m\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (8)$$

Si dividimos la ecuación (8) entre "m" se obtiene que:

$$\ddot{u}(t) + 2\xi \omega_n \dot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) = 0 \quad (9)$$

Donde  $\omega_n$  viene dada por la ecuación (4) y  $\xi$  es la fracción de amortiguamiento crítico y se plantea en la ecuación (10)

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (10) \quad ; \quad c_{cr} = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega_n} \quad (11)$$

Existen 3 posibles respuestas de un sistema amortiguado en base a su fracción de amortiguamiento crítico. Si  $\xi = 1$  o  $C = C_r$  el sistema no oscilara y regresara a su posición original a una razón como se muestra en la figura 2 y se considera que el sistema esta críticamente amortiguado, si  $\xi > 1$  o  $C > C_r$  el sistema tampoco oscilara pero volverá a su posición original de manera más lenta que un sistema críticamente amortiguado como se muestra en la figura 2 y se considera que el sistema esta sobreamortiguado. Si  $\xi < 1$  o  $C < C_r$  el sistema oscilara y se considera que el sistema es subamortiguado. Este caso es el de mayor interés para la dinámica estructural ya que todas las estructuras reales presentan valores menores al amortiguamiento crítico. La respuesta de este sistema se muestra en la figura 3.

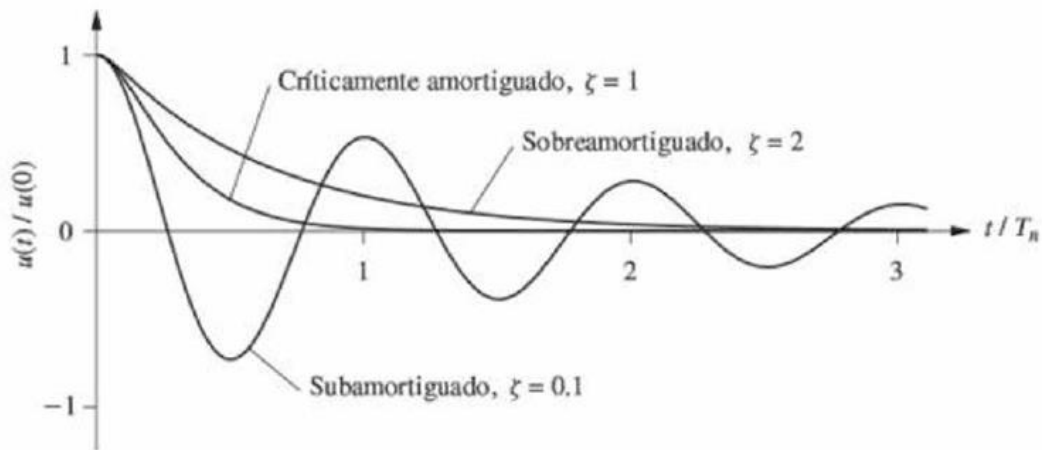


Figura 2. Vibración libre de un sistema sobreamortiguado, críticamente amortiguado y subamortiguado. (Chopra 2014)

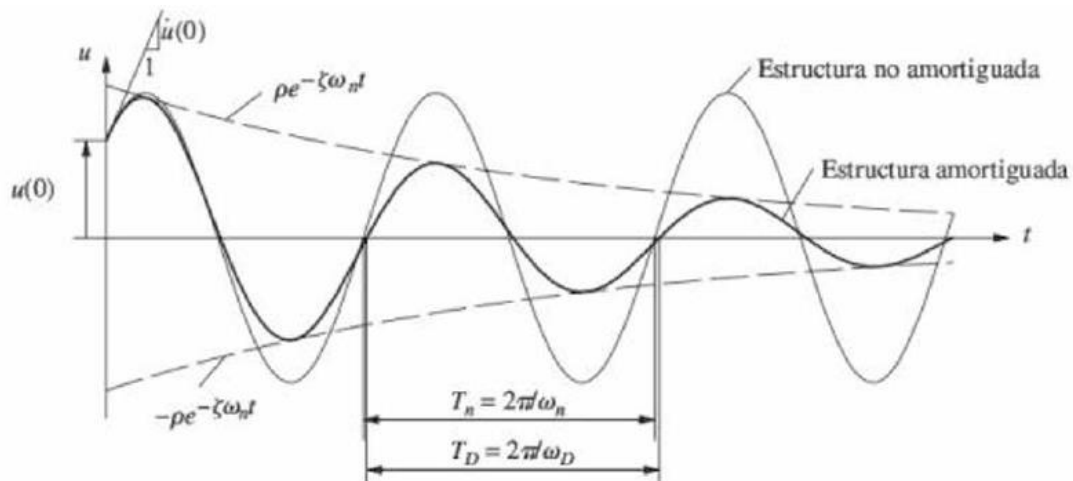


Figura 3. Amortiguamiento en vibración libre. (Chopra 2014)

Es importante destacar que las ecuaciones de periodo natural halladas anteriormente no tienen en cuenta los efectos del amortiguamiento en la estructura. El amortiguamiento genera un cierto desfase en las oscilaciones del sistema además del decaimiento de la amplitud de las oscilaciones mencionado anteriormente, a pesar de

que los periodos son muy parecidos hay casos en los que es necesario tener esta diferencia de periodo.

### 2.1.1.3. Vibración forzada no amortiguada

La respuesta de sistemas de 1 GDL ante forzantes armónicas es un tema clásico de la dinámica estructural y atañe particularmente a esta tesis ya que ambos modelos experimentales fueron sometidos a fuerzas armónicas para determinar sus respuestas. El entendimiento de este fenómeno permite extrapolar la respuesta de los sistemas a otros tipos de fuerzas.

Antes de considerar el amortiguamiento del sistema es interesante entender la respuesta del sistema sin contemplar el amortiguamiento. La ecuación diferencial de un sistema amortiguado sometido a una fuerza armónica sinusoidal de amplitud “p” y con una frecuencia específica definida como “ $\omega$ ” se plantea como:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = p \sin \omega t \quad (12)$$

La solución complementaria de esta ecuación diferencial tiene la forma:

$$u_c(t) = A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t \quad (13)$$

La solución particular dependerá de la forma de la carga harmónica aplicada. Es lógico asumir que el movimiento correspondiente es armónico y se encuentra en fase con la carga dinámica por lo tanto la solución particular vendría definida como:

$$u_p(t) = C \sin \omega t \quad (14)$$

Si ahora sustituimos la ecuación (14) en (12) se obtiene que:

$$-m\omega^2 C \sin \omega t + kC \sin \omega t = p \sin \omega t \quad (15)$$

Dividiendo la ecuación (15) entre  $\sin \omega t$  y entre k (teniendo en cuenta que  $k/m = \omega_n^2$ ) podemos despejar la constante C de modo que:

$$C = \frac{p}{k} \left\{ \frac{1}{1 - \beta^2} \right\} \quad (16)$$

El factor  $\beta$  se define como el ratio entre la frecuencia de la carga dinámica y la frecuencia natural del sistema o estructura, obsérvese que si  $\beta = 1$  la expresión (16) se convierte en una indeterminación y C tiende a infinito, por lo que el sistema vibraría sin control con una amplitud infinita lo que se conoce como resonancia, fenómeno que se explicará con detalle más adelante.

Ahora la solución general de la ecuación (12) es la suma de la solución complementaria y de la solución particular. Usando la expresión (16) podemos entonces plantear la solución general como:

$$u(t) = u_c(t) + u_p(t) = A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t + \frac{p}{k} \left\{ \frac{1}{1 - \beta^2} \right\} \sin \omega t \quad (17)$$

Se puede observar que en esta ecuación (17) las constantes A y B dependerán de las condiciones iniciales, si suponemos que el sistema parte del reposo es fácil determinar los valores de A y B, mostrados en las expresiones (18) y (19) respectivamente.

$$A = 0 \quad (18) \quad ; \quad B = -\frac{p\beta}{k} \left\{ \frac{1}{1-\beta^2} \right\} \quad (19)$$

De las expresiones anteriores se puede decir que  $p/k = U_{est}$  que es el desplazamiento que produciría la fuerza “p” aplicada de manera estática. Y el término entre corchetes de la expresión (19) representa el factor de amplificación dinámica de la forzante armónica aplicada. Ahora si se sustituyen los valores de las constantes A y B descritos en las expresiones (18) y (19) en la ecuación (17) se obtiene a expresión (20), de la cual se puede decir que el término  $\sin \omega t$  corresponde a la respuesta en régimen permanente y está directamente relacionada con la naturaleza de la forzante. Mientras que el término  $\beta \cos \omega_n t$  es la respuesta que dependerá de la frecuencia natural del sistema y es el componente de vibración libre que dependerá de las condiciones iniciales. Ya que esta respuesta tiende a desaparecer debido al amortiguamiento del sistema, esta respuesta se conoce como respuesta transitoria. En muchos casos de análisis sísmicos, de manera errónea, esta componente de la respuesta no es tomada en cuenta por su corta duración en la mayoría de los casos, sin embargo, es importante entender que en las respuestas iniciales del sistema la suma de ambas soluciones puede dar lugar a amplitudes de movimiento mucho mayores que tomando en cuenta solo la respuesta de régimen permanente.

#### 2.1.1.4. Vibración forzada amortiguada

Replantando la ecuación (12) considerando la componente de amortiguamiento se plantea la expresión (20)

$$m\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + ku(t) = p \sin \omega t \quad (20)$$

Que si se divide entre m, teniendo en cuenta que  $c/m = 2\xi \omega_n$  lleva a la expresión (21)

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) = \frac{p}{m} \sin \omega t \quad (21)$$

La solución complementaria de la ecuación anterior es mostrada en la expresión (22) mientras que la solución particular se puede observar en la expresión (23)

$$u_c(t) = [A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t] e^{-\xi\omega_n t} \quad (22)$$

$$u_p(t) = G_1 \cos \omega t + G_2 \sin \omega t \quad (23)$$

En la fórmula (22) el término  $\omega_D$  es la frecuencia natural del sistema teniendo en cuenta la amortiguación del mismo y viene dado por la ecuación:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (24)$$

A continuación se muestra la ecuación resultante de sustituir la formula (23) en la ecuación (21) y sacando factor común  $\cos \omega t$  y  $\sin \omega t$ :

$$[-G_1\omega^2 + G_2\omega(2\xi\omega_n) + G_1\omega^2] \cos \omega t + [-G_2\omega^2 - G_1\omega(2\xi\omega_n) + G_2\omega_n^2 - \frac{p}{m}] \sin \omega t = 0 \quad (25)$$

Para poder satisfacer esta ecuación para todos los valores de tiempo, ambos valores dentro de los corchetes debe ser igual a cero. Si se despejan los valores de G1 y G2 de manera simultánea y recordando que  $\beta$  es el radio entre la frecuencia de la forzante y de la frecuencia natural, se obtienen los valores mostrados en las expresiones (26) y (27)

$$G_1 = \frac{p}{k} \left[ \frac{-2\beta\xi}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \right] \quad (26)$$

$$G_2 = \frac{p}{k} \left[ \frac{1-\beta^2}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \right] \quad (27)$$

Por último la solución total para un sistema amortiguado sometido a una forzante armónica es entonces:

$$u(t) = [A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t]^{-\xi\omega_n t} + \frac{p}{k} \left[ \frac{1}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \right] [(1-\beta^2) \sin \omega t - 2\xi\beta \cos \omega t] \quad (28)$$

### 2.1.2. Sistemas de varios grados de libertad:

Si las características físicas y geométricas de un sistema son tales que la respuesta puede describirse con una sola coordenada y ningún otro modo de vibración es posible, entonces la solución de la ecuación diferencial de movimiento provee la respuesta dinámica exacta del sistema. Sin embargo, si la estructura tiene más de un modo de vibración y el sistema se simplifica a un solo grado de libertad la solución de la ecuación de movimiento es solo una aproximación de la respuesta dinámica real de sistema.

Es práctica común para el análisis de pórticos planos usar la simplificación matemática conocida como “edificio de cortante” donde las masas se concentran a nivel de los forjados, que se consideran infinitamente rígidos en su plano (en la práctica para considerar que un forjado es realmente rígido debe cumplir ciertas condiciones expuestas en las normativas correspondientes). La masa de los pilares es despreciada aportando únicamente rigidez al sistema, además se suponen perfectamente empotrados a los forjados y también se obvia la deformación axial de los mismos. Aplicando estas hipótesis el sistema queda reducido a un grado de libertad por nivel, asociado a la traslación horizontal de los forjados.

Por último se deben incluir las fuerzas de amortiguamiento asociadas a la disipación de energía del sistema, para lo cual se plantean unas fuerzas de amortiguamiento viscoso, lo que es lo mismo, que adoptar un sistema de amortiguamiento homogéneo en toda la estructura, que a pesar de no ser real, no resulta en una pérdida de precisión significativa.

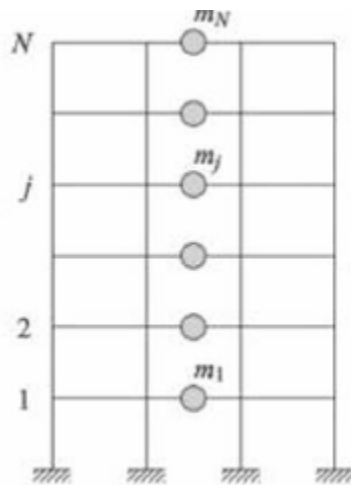


Figura 4. Esquema de edificio de cortante. Donde las masas están concentradas y los pilares solo aportan rigidez. (Clough, 1995)

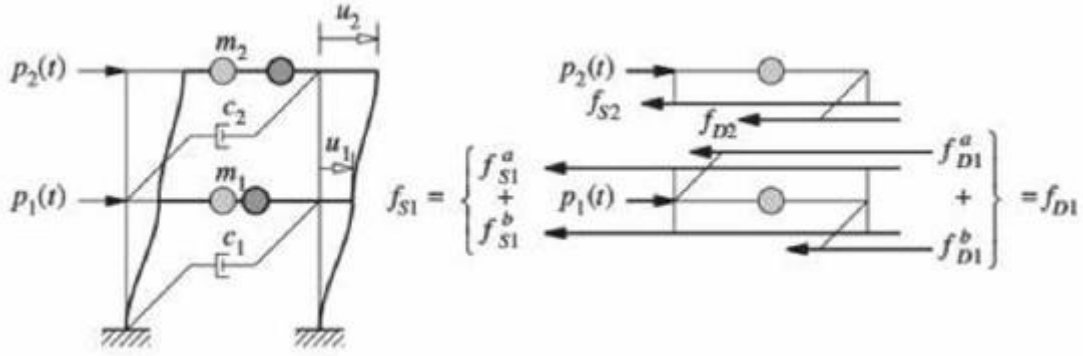


Figura 5. Esquema de edificio de corte sometido a una fuerza  $P_i$  y las fuerzas que actúan sobre una masa cualquiera (Clough, 1995)

Observando la figura 5 podemos determinar que las fuerzas que actúan en cada masa del edificio de corte incluyen la fuerza externa " $p_i$ ", la fuerza restauradora elástica o inelástica debido a la rigidez del sistema " $k_i$ " y las fuerzas de amortiguamiento debido a la disipación de la energía " $c_i$ ". La fuerza externa se supone positiva a lo largo del eje X, mientras que las fuerzas de amortiguamiento y rigidez se consideran negativas ya que se oponen al movimiento.

Planteando equilibrio para una masa cualquiera del edificio de corte se obtiene que:

$$m_i \ddot{u}_i + c_i \dot{u}_i + (k_i + k_{i+1})u_i - k_{i+1}u_{i+1} - k_i u_{i-1} = -m a(t) \quad (29)$$

La expresión (29) puede escribirse de forma matricial como:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -MJa(t) \quad (30)$$

Donde **J** es un vector columna con todos sus valores igual a la unidad, M es la matriz de masa (matriz diagonal):

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_n \end{bmatrix}$$

K es la matriz rigidez, donde cada uno de los términos  $k_{ij}$  representa la sumatoria de rigideces de los pilares que aportan rigidez al aplicar un desplazamiento unitario en la coordenada i según el grado de libertad j.

$$K = \begin{bmatrix} k_i + k_{i+1} & \cdots & -k_{i+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_{i+1} & \cdots & k_n \end{bmatrix}$$

La rigidez de cada pilar empotrado en ambos extremos viene dada por:

$$k = \frac{12 E I_c}{h^3} \quad (31)$$

Donde:

E= Modulo de elasticidad;

Ic = Segundo momento de área;

h = Altura de entre piso;

C es la matriz de amortiguamiento, que al igual que la de masa, es diagonal.

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_n \end{bmatrix}$$

Y  $\ddot{u}$ ,  $\dot{u}$  y  $u$  son los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente.  $a(t)$  representa la aceleración a la que es sometido el sistema.

### 2.1.2.1. Frecuencias naturales y modos de vibración

Al igual que en los sistemas de 1GDL las características dinámicas intrínsecas de una estructura de “n” grados de libertad se obtiene considerando sus vibraciones libres no amortiguadas. Para un sistema de estas características la ecuación de movimiento se obtiene entonces omitiendo la matriz de amortiguamiento y el vector de fuerzas aplicadas. La expresión resultante es la ecuación (1), que por conveniencia se vuelve a escribir a continuación:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (1)$$

Por analogía con el comportamiento de los sistemas de 1GDL, se supondrá que el movimiento de vibración libre es armónico simple, que puede expresarse para un sistema de “n” GDL como:

$$u(t) = \phi_n \sin(\omega t + \varphi) \quad (32)$$

Donde la forma modificada  $\phi_n$  no varía con el tiempo si no solo su amplitud. Y donde  $\varphi$  es el ángulo de fase. Derivando dos veces la expresión (32) se obtiene la aceleración del sistema en vibración libre mostrada en la expresión (33)

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2 \phi_n \sin(\omega t + \varphi) \therefore \ddot{u}(t) = -\omega^2 u(t) \quad (33)$$

Sustituyendo (32) y (33) en (1) resulta:

$$-\omega^2 m \phi_n \sin(\omega t + \varphi) + k \phi_n \sin(\omega t + \varphi) = 0 \quad (34)$$

El término sinusoidal de la expresión anterior puede ser obviado ya que es una condición arbitraria permitiendo reescribir esta expresión de la forma

$$[k - \omega^2 m] \phi_n = 0 \quad (35)$$

La expresión (35) es una forma se denomina problema matricial de valor característico o “eigenvalor”. Las matrices de  $k$  y  $m$  son conocidas por lo que el problema consiste en encontrar los valores de  $\omega^2$  y el vector  $\phi_n$ . Donde los valores escalares de  $\omega^2$  son las frecuencias naturales y el vector  $\phi_n$  determina los modos o formas de vibración del sistema.

También de la expresión (35) podemos concluir que siempre existe la solución trivial de  $\phi_n = 0$  que no es de interés ya que indica que no existe movimiento, además de una segunda solución trivial si el determinante del término dentro de los corchetes es igual a cero.

La componente dentro de los corchetes se conoce como ecuación de frecuencias del sistema. Si se expande el determinante de la expresión dentro de los corchetes se



obtiene  $N$  raíces reales positivas para  $\omega^2$  que representan las frecuencias para  $N$  modos de vibración posibles en el sistema. El modo con la menor frecuencia es conocido como “primer modo” o “modo fundamental” y suele ser el de mayor interés (dependerá de la regularidad de la estructura).

### 2.1.3. Análisis modal

Entendiendo lo antes explicado se puede entonces definir el análisis modal como el proceso mediante el cual se puede describir un sistema o estructura en base a sus parámetros modales o sus propiedades dinámicas que son: - las frecuencias, - el amortiguamiento – los modos de vibración para todos los modos en el rango de frecuencias de interés. Todas las estructuras poseen modos de vibración y frecuencias naturales, que como se pudo demostrar, dependerán básicamente de la masa y la rigidez de la misma. En el diseño es importante conocer estos parámetros y establecer la respuesta de la misma ante ciertas cargas, por lo que el análisis modal es una herramienta eficiente para entender y describir el comportamiento de las estructuras.

En el análisis modal una deformación compleja se descompone en una serie de modos de vibración o deformación en base a los parámetros de frecuencia, amortiguamiento, rigidez y masa individuales, cuyo fin último es plantear un Modelo Modal que describa el comportamiento del sistema.

Los parámetros modales son importantes porque describen las propiedades dinámicas inherentes a una estructura. El conocimiento del amortiguamiento modal, por ejemplo, es útil para predecir la fatiga y reducir las respuestas de resonancia de una estructura. Cuando se aplica una excitación dinámica tendrá componentes en cierto rango de frecuencias, pero la estructura solo entrará en resonancia cuando estas componentes coincidan con las frecuencias naturales del sistema, en cuyo caso la respuesta será una superposición lineal de todos los modos de vibración excitados.

El análisis modal posee muchas aplicaciones, entre las que se pueden destacar:

- Estimar los esfuerzos de los elementos debido a diferentes tipos de cargas y excitaciones
- Entender la respuesta de las estructuras ante cargas dinámicas.
- Medir las propiedades de una estructura cuando se somete a una vibración para refinar modelos analíticos. Son cada vez más comunes los ensayos dinámicos combinados con modelos de elementos finitos para mejorar los modelos numéricos a partir de los cuales se pueden identificar parámetros de las secciones, apoyos, etc.
- Controlar la integridad estructural y su comportamiento para detectar problemas y prevenirlos, como en el caso específico de puentes ante acciones de viento o cargas cíclicas de vehículos cada vez más pesados, evitando de esta manera resonancia y disminuyendo la fatiga

### 2.1.4. Análisis en el dominio de la frecuencia

La respuesta de cualquier sistema lineal de un grado de libertad puede ser determinada usando análisis en el dominio del tiempo, sin embargo, a veces es conveniente que esta respuesta sea expresada en el dominio de la frecuencia como se explicará en este apartado. En algunos casos donde en la ecuación de movimiento existen parámetros que dependen de la frecuencia, como la rigidez o el amortiguamiento las aproximaciones



obtenidas con análisis en el dominio de la frecuencia son mucho mejores que los análisis en el dominio del tiempo.

La transformada de Fourier es una herramienta muy eficiente para la solución de ecuaciones diferenciales, en nuestro caso la ecuación de movimiento para sistemas lineales.

En este método de análisis en el dominio de la frecuencia implica expresar una carga dinámica aplicada en términos de componentes armónicas, evaluar la respuesta de la estructura para cada componente y después superponer las respuestas de cada componente para obtener la respuesta total del sistema.

Para este fin las series de Fourier son presentadas en las expresiones (36) y (37)

$$P(t) = \frac{\Delta\omega}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_{(\omega)} e^{-i\omega t} \quad (36)$$

$$P_{(\omega)} = \int_{-\frac{T_p}{2}}^{\frac{T_p}{2}} P(t) e^{-i\omega t} dt \quad (37)$$

Si el periodo de la carga tiende a infinito, el aumento de la frecuencia se vuelve infinitesimal y la función discreta de la frecuencia se convierte en una función continua, por lo que los límites de las expresiones (36) y (37) pueden tomar las formas de las integrales expuestas en las expresiones (38) y (39) que son conocidas como la inversa de Fourier y la Transformada directa de Fourier respectivamente. Usando la transformada directa de Fourier la carga arbitraria  $P(t)$  puede expresarse como una sumatoria infinita de amplitudes complejas. Una condición necesaria para que la transformada de Fourier pueda aplicarse es que la integral (40) sea finita. Claramente esto ocurre cuando la carga arbitraria  $P(t)$  actúa en un periodo de tiempo finito.

$$P(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P_{(\omega)} e^{-i\omega t} d\omega \quad (38)$$

$$P_{(\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) e^{-i\omega t} dt \quad (39)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |P(t)| dt \quad (40)$$

Entonces la respuesta total para un sistema lineal amortiguado de un solo grado de libertad puede expresarse como

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_{(\omega)} P_{(\omega)} e^{-i\omega t} d\omega \quad (41)$$

La función compleja de respuesta de la frecuencia  $H(\omega)$  tiene la forma equivalente mostrada en la expresión (42) y es la que describe la respuesta del sistema ante una carga armónica arbitraria.

$$H(\omega) = \frac{1}{k} \left[ \frac{1}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \right] \quad (42)$$

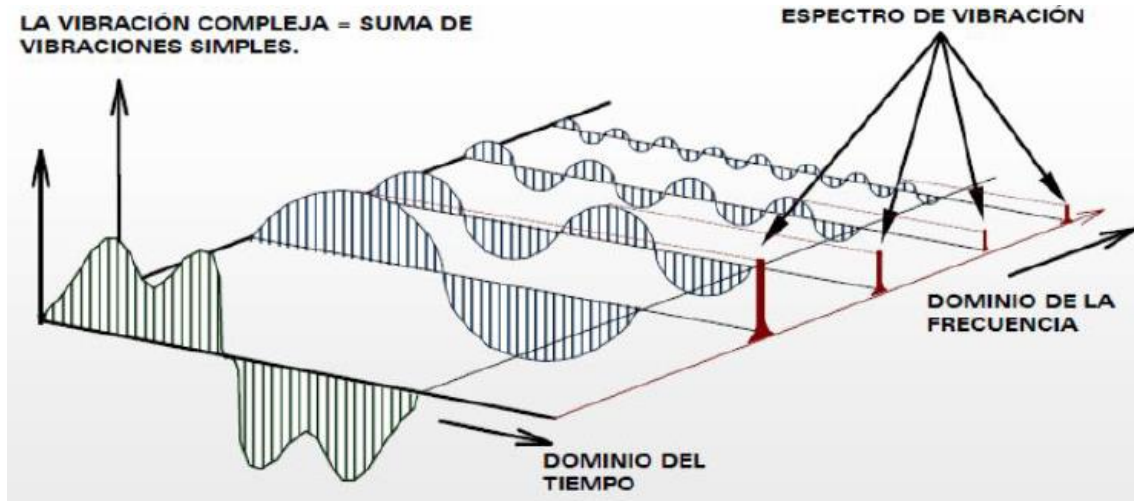


Figura 6. Comparación espectro en dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

## 2.2. Microcontroladores. Software y Hardware

En esta investigación, la placa de prototipado usada para la adquisición de datos experimentales es de la marca Arduino. Arduino es básicamente una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source). Es bastante simple de usar y existe una comunidad en la que cualquier interesado puede encontrar y tener acceso a una gran cantidad de información y proyectos alrededor del mundo. Aunque está diseñada para un uso más creativo y recreacional tiene un gran potencial como herramienta educativa. Y no solo eso, gracias a lo económico de los equipos, la relativa precisión que se puede lograr y la amplia gama de sensores compatibles podría llegar a usarse en laboratorios de distintas ramas de investigación e incluso para mediciones en campo.

Con Arduino se puede “enlazar” el mundo real con el mundo digital. El dispositivo “siente” el mundo real a través de los sensores, e interactúa con este accionando motores, luces, pantallas, o simplemente almacenando datos para su posterior uso. Lo que ha permitido usar placas similares a las Arduino con sensores de bajo costo para análisis modales operacionales OMA, por sus siglas en inglés “*Operational Modal Analysis*” con resultados bastante satisfactorios.

### 2.2.1. Hardware

La placa Arduino DUE posee un microcontrolador Atmel SAM3X8E con arquitectura ARM Cortex-M3, es la primera placa de Arduino basada en un microcontrolador de 32-bits. Trabaja a una frecuencia de alrededor 84MHz, tiene 96kb de memoria SRAM con control de acceso DMA y 512kb de memoria flash para programar. La placa dispone de 54 pines que se pueden configurar como entradas y salidas digitales, algunos de los cuales son multifunción y 12 pines analógicos. Dispone de dos canales para conectar usando I2C y un cabezal para protocolo SPI. Y además es importante comentar que

tiene una entrada de alimentación de 2.1mm que soporta una corriente continua de entre 5 y 12 voltios.

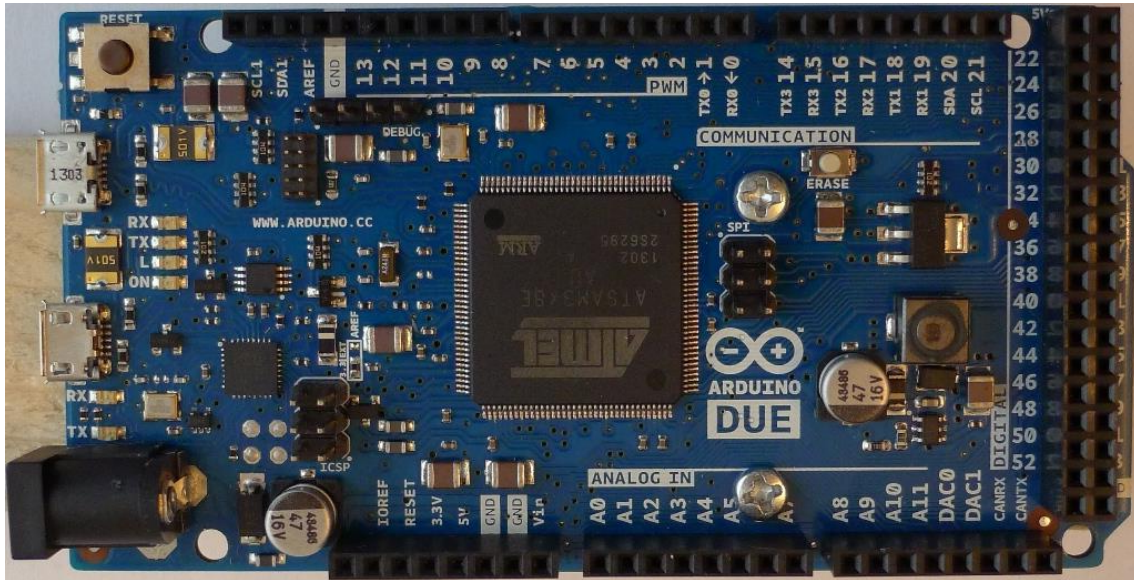


Figura 7. Placa Arduino DUE.

### 2.2.2. Convertidor Analógico Digital

Es el sistema que nos permite “enlazar” el mundo real con el digital, lo que nos permite utilizar el Arduino como un sistema de adquisición de datos. Este convertidor analógico digital o ADC por sus siglas en inglés (Analog to Digital Converter), como su nombre lo indica, es un sistema que convierte el voltaje analógico en voltaje digital. El Arduino tiene un ADC interno de 12-bits devolviendo enteros con  $2^{12}$  posibles combinaciones. La velocidad de muestras por segundo que puede llegar a manejar el Arduino es más que suficiente para el estudio de estructuras cuyas frecuencias naturales suelen ser bajas como se demostrara en el desarrollo de este documento.

En el capítulo 3 se muestran resultados experimentales de velocidad de muestreo y resolución que puede alcanzar el Arduino Due como datos importantes de un sistema de adquisición de datos.

### 2.2.3. Software

Arduino IDE, siglas de “Integrated Development Environment” es el software utilizado para cargar los programas que ejecutara el Arduino, este software es una herramienta sencilla de utilizar, gratuita y de código abierto.

El código fuente del entorno Java está basado en lenguaje C/C++ y puede ser expandido mediante el uso de bibliotecas, que son funciones programadas fuera del entorno del software y llamadas posteriormente durante la escritura del programa.

Los programas escritos en Arduino IDE pueden ser divididos en tres partes fundamentales: Estructura, Valores (variables y constantes) y Funciones.

#### 2.2.3.1. Estructura

La estructura del software comprende dos funciones principales:

- Setup(): esta función es llamada al iniciar el “sketch” (es el término con el que se define el programa de Arduino. Se usa para inicializar los pines de lectura, llamar librerías, configurar modos de los pines, entre otras. Esta función solo se ejecuta una vez.
- Loop(): esta función se ejecuta una vez finalizado el Setup() y se repite de manera consecutiva. Esta función permite ejecutar una o varias declaraciones múltiples veces y siguen la misma estructura de los bucles en la mayoría de lenguajes de programación.

### **2.2.3.2. Valores**

Las variables en el lenguaje de programación C/C++ puede clasificarse según el lugar donde esas son declaradas, en base a esto se definen tres tipos de variables:

- Variables locales: son aquellas que son definidas dentro del bloque de una función.
- Variable local: son aquellas que se declaran fuera de cualquier función.
- Parámetros formales: son aquellas variables que se usan para definir los parámetros de una función específica.

En C/C++ las variables se refieren a un extenso sistema para declarar valores y funciones de diferentes tipos. Estos tipos de variables determinan cuanto espacio ocupan dentro del programa y como el patrón de bits que almacena es interpretado por el software.

Los tipos de datos o variables que se pueden encontrar en el Arduino IDE son:

- Void: indica la declaración de una función de la que no se esperan valores de retorno.
- Boolean: almacena verdadero o falso.
- Char: esta variable permite almacenar uno o varios caracteres.
- unsigned char: ocupa un byte de memoria, alojando números entre 0 y 255.
- byte: a este tipo de variable se le puede asignar un número entre 0 y 256. Pesa 8-bits.
- int: es la abreviación de integer, es el principal tipo de variable para almacenar números. Tiene una capacidad de 16-bits y solo puede almacenar valores enteros.
- unsigned int: funciona igual que aquellas de tipo int, pero solo almacena valores positivos.
- Long: es parecida a las vaibles int y unsigned int, pero tiene el doble de espacio almacenando números desde 0 hasta 4.294.967.295.
- short: es un tipo de variable de 16-bits que permite asignar numero entre -32.768 y 32.767

- float: a diferencia de la variable int esta permite almacenar números positivos con decimales.

### 2.2.3.3. Funciones

Las funciones permiten estructurar el programa en segmentos de código para realizar tareas específicas. El caso típico de utilización de funciones es cuando se necesita realizar la misma acción muchas veces.

Agrupar el código en funciones tiene muchas ventajas, entre las cuales se pueden mencionar:

- Ayuda al usuario a mantenerse organizado. A menudo ayuda a conceptualizar el programa.
- Las funciones concentran las tareas en una sola parte del código, lo que permite analizarlas y depurarlas una sola vez.
- Reduce las posibilidades de error cuando es necesario hacer cambios al programa.
- Permiten reducir el tamaño del código ya que permite reutilizar las funciones cuando sea necesario.
- Facilitan la reutilización del código en otros programas al convertirlo en una secuencia modular.

Como se explicó en el apartado de estructura del software, este posee dos funciones por defecto que son el setup() y el loop() las demás funciones deberán crearse fuera de estos dos bloques.

La sintaxis más común para definir funciones se puede apreciar en la figura 8.

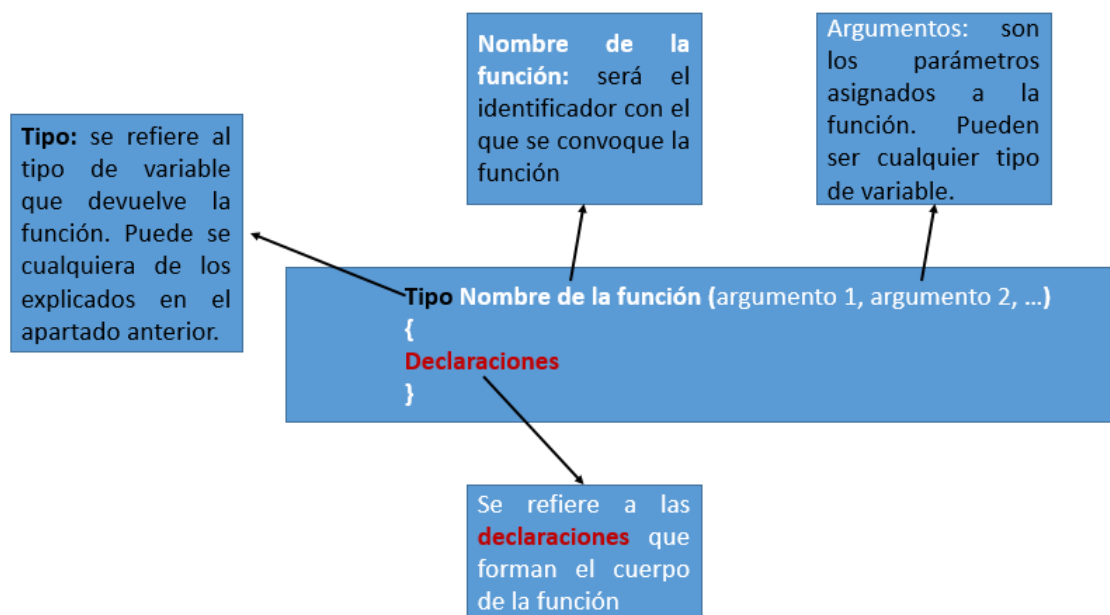


Figura 8. Estructura típica de una función en C/C++.



Las bibliotecas de Arduino, y aquellas creadas por otros usuarios, permiten usar sensores de manera sencilla. Las tareas de comunicación entre el microcontrolador y el sensor se reducen a llamar las funciones definidas en las bibliotecas.

#### 2.2.3.4. Funciones básicas

Arduino contiene por defecto ciertas funciones que serán ejecutadas solo con llamarlas. A continuación se presenta una lista de algunas de las funciones básicas más comunes que se pueden encontrar en los códigos de la presente investigación:

- `analogRead()`: Lee los valores de un pin analógico específico. El número del pin que se quiere leer se escribe entre los paréntesis de la función. Esta función es utilizada para obtener lecturas del sensor analógico (ADXL 335)
- `analogReadResolution()`: Permite configurar la resolución del ADC de la placa. En el caso del Arduino DUE este parámetro por defecto está en 10-bits, pero se puede configurar para que trabaje en 12-bits como es el caso de esta investigación. la resolución deseada se escribe entre los paréntesis de la función.
- `delay()` y `delayMicroseconds()`: Crea una pausa en la ejecución del programa. El tiempo de pausa deseado se introduce entre los paréntesis de la función. Para el caso del `delay()` la unidad son milisegundos, mientras que para el `delayMicroseconds()` la unidad se debe colocar en microsegundos. La utilización de esta función es de vital importancia para controlar la velocidad de muestreo de la placa, evitar pérdida de datos y/o reducir posibles errores al recibir datos.
- `micros()` y `millis()`: Con esta función se puede imprimir el tiempo de ejecución del programa, lo que permite entre otras cosas, crear los diagramas de lectura vs tiempo. La función `micros()` imprime el tiempo en microsegundos, mientras que `millis()` imprime el tiempo en milisegundos.
- `digitalRead()` y `digitalWrite()`: son funciones para comunicarse directamente con los sensores. `digitalRead()` permite leer si un pin digital está “abierto” o “cerrado” y `digitalWrite()` envía parámetros al sensor para que funcione según lo deseado. El funcionamiento de estas funciones se puede observar en el capítulo 3 en el apartado de codificación del ADXL 345.
- `Serial.print()` y `Serial.println()`: con estas funciones se puede escribir en el monitor serial del software, tanto el valor que devuelve cierta función o un texto cualquiera. Para imprimir una función o variable basta con escribir el nombre de la variable o de la función entre los paréntesis de la misma, así por ejemplo, si se escribe `Serial.println(millis())` se escribirá el tiempo de ejecución del sketch. Para escribir texto es necesario usar comillas, por ejemplo, `Serial.print("Universitat Politècnica de Catalunya")` aparecerá esta frase en el monitor. La diferencia entre estas dos funciones es que `Serial.print()` imprime continuamente sobre la misma línea, mientras que `Serial.println()` escribirá cada valor devuelto por una función en una línea nueva.

### 2.3. Acelerómetros

Actualmente es posible encontrar acelerómetros en una gran cantidad de ramas de la ciencia y la salud con un abanico de aplicaciones que van desde ocio y entretenimiento hasta aplicaciones médicas. Sin embargo, esto no siempre fue así, inicialmente los acelerómetros eran productos exclusivos del mercado científico, pero que gracias a la

reducción de costos, mejoras en los filtros de señales y su reducción en el consumo de energía se abrieron paso en la industria de los juegos incorporándose a los mandos de las consolas, en cualquier teléfono moderno de gama media en adelante podemos encontrar acelerómetros, los vehículos usan acelerómetro para activar las bolsas de aire una vez detecta la colisión y los ordenadores portátiles lo utilizan para detectar caída libre y bloquear el disco duro y prevenir daños.

De manera simplificada un acelerómetro es un dispositivo que mide la aceleración en una dirección específica. Cuando un acelerómetro está ubicado en una superficie plana el eje perpendicular a esta siempre tendrá una aceleración de 1G, esta componente de gravedad puede ser utilizada para calibrar el equipo o con cálculos vectoriales simples para detectar el Angulo de inclinación del dispositivo permitiendo su uso en robótica, video juegos, ubicación espacial en realidad virtual entre otros.

Tanto el ADXL 335 como el ADXL 345 (ambos utilizados en el desarrollo de esta investigación) entran en la clasificación de sistemas microelectromecánicos (Microelectromechanical System, MEMS) que es básicamente tecnología electromecánica y micrométrica que se fusionan para generar sistemas nanoelectromecánicos. La fabricación de sensores ha hecho grandes progresos gracias a las mejoras en esta tecnología pudiendo reducir el tamaño y el consumo de los mismos al mismo tiempo que aumenta la resolución y exactitud de los mismos. Por lo que no es difícil proyectar que en los próximos años existan acelerómetros de bajo coste con prestaciones mucho mayores que los actuales pero con sistemas de comunicación y programación parecidos.

El acelerómetro MEMS típico se compone de una masa móvil con placas que se unen a través de sistema de suspensión mecánico a un marco de referencia, como se muestra en la figura 8. Este marco de referencia posee unas placas fijas intercaladas con las placas de la masa móvil. El movimiento de la masa es medido calculando la diferencia de capacitancia entre los condensadores de las placas (Lyshevski, 2002). Cuando la gravedad es cero, las capacitancias de ambas placas son iguales, ya que la placa móvil se encuentra equidistante a las placas fijas.

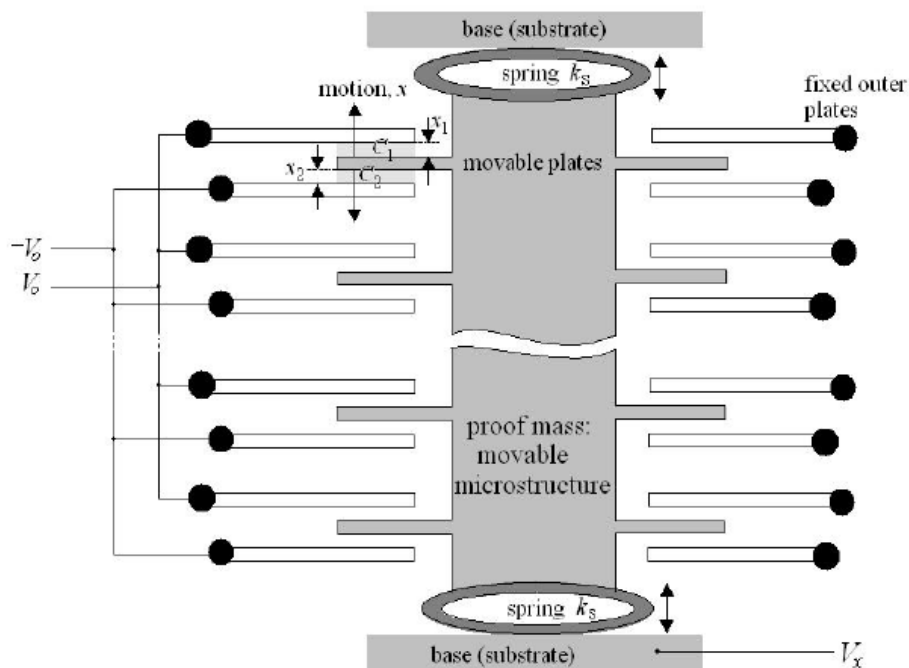


Figura 9. Estructura de un acelerómetro MEMS típico.

El uso de ambos acelerómetros será explicado en el capítulo 3. Además en el capítulo 7 se anexan los enlaces de sus fichas técnicas o, por su término en inglés “datasheet” donde está toda la información sobre su funcionamiento interno y sus diferentes características.

### 2.3.1. Digital vs analógico

Antes de entrar en detalles sobre los acelerómetros utilizados es importante entender la diferencia fundamental entre estos dos dispositivos. Un acelerómetro analógico tiene una salida de voltaje continua en función de la aceleración registrada, mientras que un acelerómetro digital trabaja con impulsos o por lo que presenta señales discretas. Generalmente la selección entre sensores analógicos y digitales va ligada al hardware que se utilizara como sistema de adquisición de datos. Sin embargo como se mencionó anteriormente el Arduino Due posee entradas tanto digitales como analógicas lo que permite comparar el comportamiento de ambos dispositivos y plantear una recomendación de cual es más apropiado el estudio de parámetros modales basados en resultados experimentales.

Generalmente los dispositivos analógicos permiten una mayor velocidad de muestreo, además los sensores digitales son más propensos a tener errores en los datos enviados, ya que estos últimos deben “traducir” y rearmar los datos.

La comunicación entre la placa y los sensores se hace de manera distinta. Tanto en programación como en conexión. En el capítulo 3 se muestran los códigos, protocolos y cableados empleados en ambos casos.



### 3. MODELO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Introducción

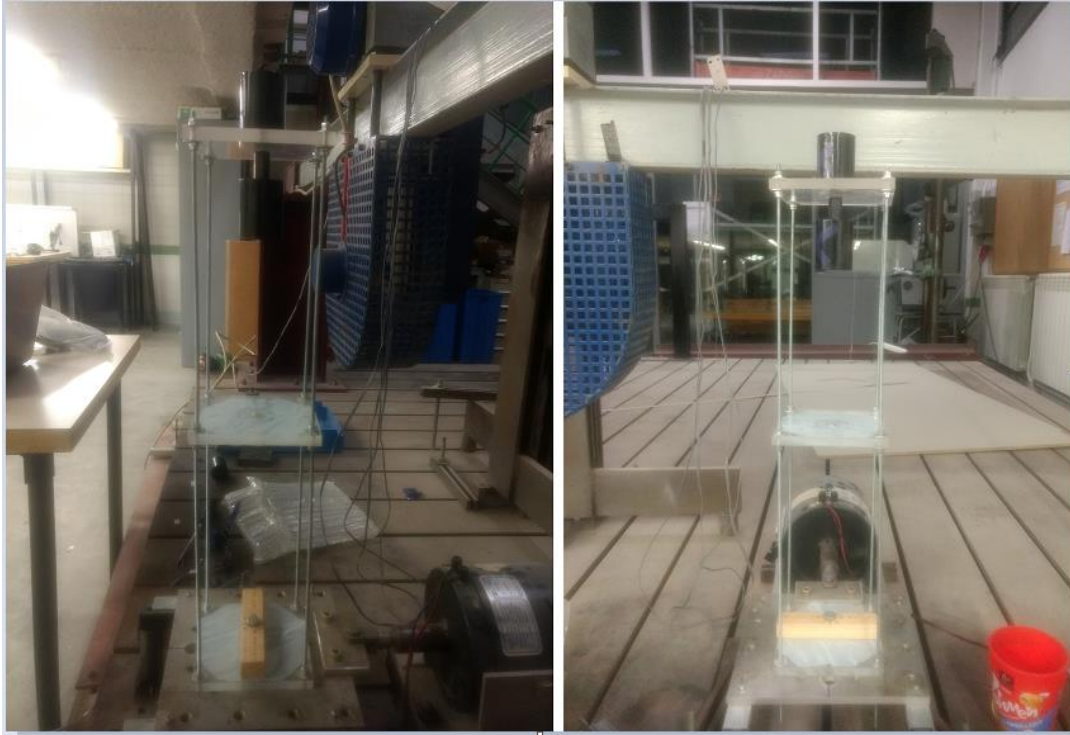
Esta primera fase experimental se llevó a cabo en dos etapas, la primera consistió en el ensayo de un edificio de escala reducida de 2 niveles y 4 pilares con una altura total de 51cm (ver figura 10), el cual se denotará con el nombre de Estructura 1. Los materiales y configuración del mismo se explican con mayor detalle más adelante. Esta primera etapa tenía como dos objetivos principales:

- Obtener parámetros modales y documentar la respuesta de la Estructura 1 para su posterior comparación con el modelo numérico.
- Calibrar y familiarizarse con los instrumentos de medición y adquisición de datos, conociendo su rango, resolución y otras características técnicas necesarias para una correcta toma de datos.

Y una segunda etapa en la que se ensayó un modelo de mayor tamaño y complejidad geométrica (Ver figura 11), el cual se denotará con el nombre de Estructura 2 (los materiales y configuración del mismo se explican con mayor detalle más adelante). En líneas generales la estructura posee 4 niveles y 6 pilares con una altura total de 160cm. Esta segunda etapa experimental tenía como objetivos los siguientes:

- Obtener parámetros modales y documentar la respuesta de la Estructura 2 para su posterior comparación con el modelo numérico.
- 

En el presente capítulo se describen los materiales usados y la configuración geométrica detallada de cada modelo, se describen los equipos utilizados (sensores, equipo de adquisición de datos y excitadores), calibraciones y otros datos de importancia y por último se muestra el plan experimental su ejecución y algunos resultados.



*Figura 10. Estructura 1.*



*Figura 11 Estructura 2*

## 3.2. Descripción de las estructuras ensayadas

Como se explicó en el apartado anterior se ensayaron dos estructuras con configuraciones, tamaños y materiales diferentes. A continuación se describen de manera detallada los materiales y ensamblajes de ambas estructuras.

### 3.2.1. Estructura 1

La estructura consta de dos niveles con una altura libre de 245mm y una altura total de 520mm, los pilares están configurados en un cuadrado cuyas aristas, de centro a centro de los pilares, es de 105mm. Los forjaos son cuadrados de metacrilato de 120x120x10mm. La descripción de los elementos utilizados para el montaje de la estructura son los siguientes:

#### 3.2.1.1. Pilares

Los pilares son barras de acero roscadas cuyo radio nominal es de 4.5mm. Las propiedades del acero son bien conocidas. A efectos de esta investigación las variables a tomar en cuenta son:

- Densidad: 7850kg/m<sup>3</sup>
- Coeficiente de Poisson: 0.30
- Módulo de elasticidad: 2,10x10<sup>5</sup>n/mm<sup>2</sup>

Cabe destacar que estas características son generales para el acero, sin embargo, no se realizó ningún tipo de ensayo, ni existen especificaciones técnicas por parte del vendedor que validen estos datos. Esto, como será explicado en el próximo capítulo, genera incertidumbres en el modelo numérico pudiendo existir diferencias entre los resultados numéricos y experimentales.

Para reducir este tipo de incertidumbre en estudios futuros, que requieran una mayor precisión se recomienda la realización de ensayos de probetas a tracción y/o fluencia para simular de manera más exacta el fenómeno físico.



*Figura 12. Varillas roscadas y uniones con forjados.*

### 3.2.1.2. Forjados:

Los forjados son de metacrilato de 120x120mm y 10mm de espesor, presentan un coeficiente de Poisson relativamente alto aportando rigidez a los forjados y permitiendo que la estructura se comporte prácticamente como un pórtico de cortante. Las características mecánicas de este material se recogen en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del Metacrilato

METACRILATO (Valores tipo a 23°C y 50% de humedad relativa)			
PROPIEDADES MECANICAS	NORMA	UNIDAD	VALORES
Densidad	DIN53479	g/c m <sup>3</sup>	1.19
Resistencia al impacto Charpy	ISO 179 1/D	kJ/ m <sup>2</sup>	15
Resistencia al impacto con entalladura (Izod)	ISO 180 1/A	kJ/ m <sup>2</sup>	1.6
Estiramiento a rotura	DIN53455	%	5.5
Coeficiente de Poisson	-	-	0.45
Resistencia a la flexión	DIN53452	Mpa	115
Probeta standard (80x10x4mm)			
Tensión por compresión	DIN53454	Mpa	110
Tensión de seguridad max. (hasta 40° C)	-	Mpa	5...10
Módulo de elasticidad E (Corto/largo plazo)	DIN 53457	Mpa	3300/3200
Módulo de torsión G en 10 Hz	DIN53445	Mpa	1700
Coeficiente de fricción plástico sobre plástico	-		0.8
Coeficiente de fricción plástico sobre acero	-		0.5
Coeficiente de fricción acero sobre plástico	-		0.45

### 3.2.1.3. Base:

La base de la estructura es una placa metálica agujereada apoyada sobre dos rieles y sujeta por un extremo por un actuador de ondas sinusoidales (que será descrito más adelante en este capítulo). Además de una placa de metacrilato que le da una mayor longitud de anclaje a los pilares para garantizar que el comportamiento de los pilares sea lo más parecido posible a un empotramiento.





Figura 13. Base de la Estructura 1 (sin actuador).

#### 3.2.1.4. Masa adicional en el forjado superior

Las frecuencias naturales de una estructura dependen básicamente de la rigidez y la masa del sistema. Ya que en la Estructura 1 existente incertidumbres del grado de empotramiento en la base, de la rigidez de las uniones e incluso de las propiedades físicas del acero de los pilares, se añadió una masa extra en el último nivel de tal manera que estas incertidumbres tengan menos influencia en el resultado final.

Para ello se agregaron de manera simétrica 2 cilindros, uno en la parte superior del forjado y uno en la parte inferior del forjado, la idea de colocarlos así es intentar perturbar lo menor posible la altura del centro de gravedad del último forjado. Cada cilindro pesa aproximadamente 500 gr cada uno. En la figura 14 se puede apreciar el pesaje de los cilindros y en la 15 se puede ver la forma en la que fueron ensamblados a la estructura.

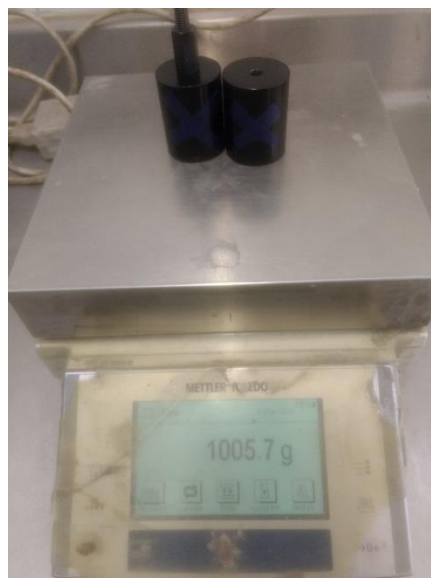
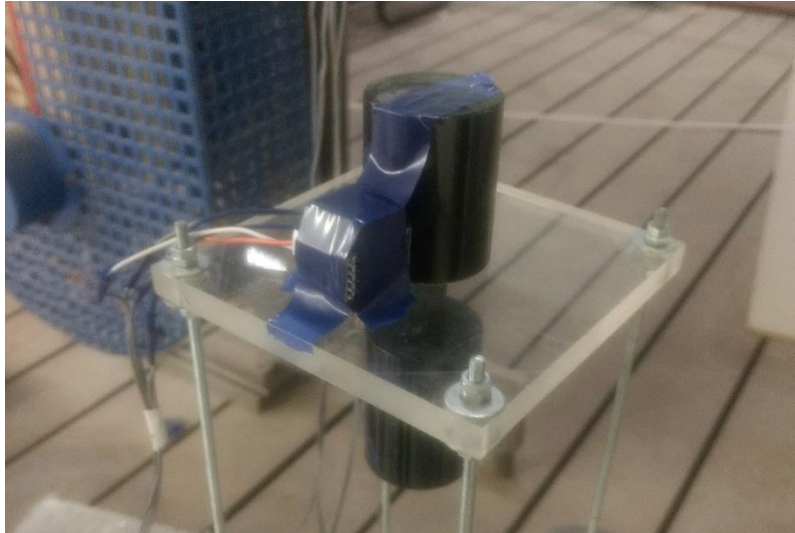


Figura 14. Pesaje de las masas adosadas al último forjado.



*Figura 15. Ensamblaje de los cilindros.*

#### **3.2.1.5. Ensamblaje del modelo:**

Para las uniones entre los forjados y los pilares se utilizó un sistema de doble tuerca con arandelas para buscar una unión lo más rígida posible (ver figura 12)

#### **3.2.2. Estructura 2**

En líneas generales la Estructura 2 está formada por 6 pilares con secciones en L y 35 vigas conformadas por pletinas, ambos elementos estructurales son de acero. La altura libre entre niveles es de 40 cm, el alto total es de 160 cm un ancho de 77cm y un largo aproximado de 145cm.

A continuación se presenta de forma esquemática la forma y dimensiones de la estructura antes de entrar en detalle de los elementos que la conforman.

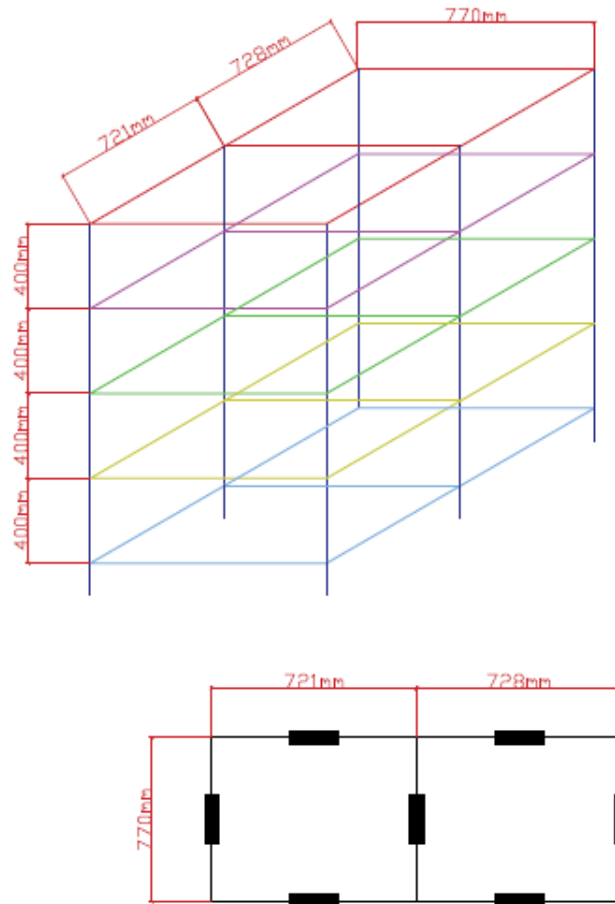


Figura 16. Esquema estructural de la Estructura 2.

### 3.2.2.1. Pilares

Los pilares son continuos desde la base hasta la parte superior del sistema, están conformados por secciones L de 20x20x2mm y están soldados a unas planchas cuadradas que a su vez están fijadas a la mesa vibratoria a través de pernos.

Es importante comentar que algunas de estas placas de anclaje están unidas mediante un solo perno e incluso las placas de los extremos no tienen el 100% de su superficie apoyada en la mesa por lo que es de esperarse que permitan un pequeño giro cuando la estructura esta en movimiento. Estos giros aunque pequeños pueden ser fuentes de error al momento.

### 3.2.2.2. Vigas

Las vigas están conformadas por secciones rectangulares de acero de 20x10mm las longitudes de estas vigas es de aproximadamente 72 cm en los pórticos de dos tramos y 77 cm en los pórticos de un solo tramo. Están conectadas a los pilares mediante pernos a las caras externas de los perfiles L de los pilares como se indica en la figura 14.

Aunque para el modelo numérico se tomaron estas uniones como totalmente solidarias es posible que, a pesar de, tomar la previsión de revisar y apretar todas las uniones antes de la experiencia, existan giros y que estas uniones no sean 100% rígidas. Lo que podría producir diferencias entre lo resultados prácticos y los obtenidos por el análisis numérico.



*Figura 17. Ensamblaje Estructura 2*

### **3.2.2.3. Base**

La Estructura 2 fue excitada mediante una mesa vibratoria cuadrada de 170x170 cm conectada a unos gatos hidráulicos que le otorgan capacidad de movimiento en las 3 direcciones, aunque para la presente investigación solo se utilizó 1 dirección.

Para configurar el movimiento de la mesa basta con definir una coordenada X, Y y/o Z y una amplitud que es velocidad con que la mesa se moverá de un determinado punto a otro. Una vez definida una función harmónica solo es cuestión de modificar las coordenadas y la amplitud para obtener la frecuencia deseada. A diferencia del actuador de la Estructura 1, este permite recrear movimientos sísmicos reales en las 3 direcciones.

La mesa vibradora está gobernada por un control numérico computarizado o CNC Sinumerik 805 de la marca Siemens. En líneas generales un CNC es un sistema donde un ordenador es capaz de controlar la posición (en coordenadas cartesianas XYZ) y la velocidad de los motores que accionan los diferentes ejes. Así, resulta posible conseguir desplazamientos como arcos o círculos, diagonales, helicoides y otras figuras tridimensionales de gran complejidad.

En las figura 18 se pueden observar tanto la base móvil donde se apoya la estructura y el CNC que la controla.





Figura 18. CNC Sinumerik 805 Software versión 2 y base móvil con la Estructura 2.

#### 3.2.2.4. Masas adicionales

A la Estructura 2 fueron adosados, a medias luces de todas las vigas, unas masas adicionales de aproximadamente 4,5 kg. Esta carga consisten 8 pletinas de 200mm de largo por 5mm de ancho y 10mm atadas a las vigas mediante 4 pernos y 2 placas pequeñas de acero como se pudo observar en la figura 17



Figura 19. Masas Adicionales Estructura 2.

### 3.3. Descripción de los equipos

En este apartado se detallara los dispositivos utilizados para la lectura de magnitudes físicas, los equipos de adquisición de datos y los generadores de vibraciones conectado a las bases de ambas estructuras.

La instrumentación utilizada está conformada por dos sensores: un acelerómetro digital ADXL 345 y un acelerómetro analógico ADXL 335. Ambos con capacidad para detectar aceleración en los 3 ejes, aunque para este estudio solo se tomaron datos en una sola

dirección. Y el sistema de adquisición de datos elegido para esta investigación fue la placa de hardware abierto Arduino Due. A continuación se explica a detalle el procedimiento seguido en los ensayos para el manejo y obtención de datos usando estos dispositivos.

### 3.3.1. Sistema de adquisición de datos

Como se comentó en capítulos anteriores la placa utilizada en esta investigación fue el Arduino Due por su gran poder de muestreo, su bajo coste, su alta compatibilidad con una amplia gama de sensores y por permitir, entre otras ventajas citadas anteriormente, conectar más de un acelerómetro usando comunicación I2C, que a diferencia del protocolo SPI es más fácil de programar y requiere menos cableado.

Para determinar la capacidad de esta placa como sistema de adquisición de datos se realizaron ensayos de muestreo, resolución, pérdida de datos y algunos datos técnicos sobre el ADC del Arduino Due

#### 3.3.1.1. Muestreo

El tiempo de muestreo es el tiempo que transcurre entre dos mediciones consecutivas, esto es fundamental para la adquisición de datos y suele expresarse en frecuencia. Siempre que se mida una magnitud, como por ejemplo los periodos de una estructura o sistema, es fundamental que nuestra frecuencia de muestreo sea superior a la frecuencia del sistema, de no ser así, existirá pérdida de datos y los resultados no serán correctos.

Existen teoremas sobre cuál es la velocidad mínima de muestreo de una señal para poderla reconstruir sin pérdida de datos. Teoremas como el de Nyquist o Teorema de muestreo, que plantean que una señal con un ancho de banda limitado puede ser reconstruida de manera exacta si es muestreado al menos al doble de velocidad de la mayor frecuencia barrida.

A continuación se ejecuta un sencillo código que permite determinar la frecuencia de muestreo de nuestra placa y garantizar que es suficiente para generar resultados correctos.

El código utilizado para lograr este objetivo es el siguiente:

```
void setup() {

    Serial.begin(9600);
    muestreo();

}

void loop() {

}

void muestreo() {

    unsigned long timel=0;
    unsigned long time=0;
    Serial.println("*****");
    Serial.println("ENSAYO FRECUENCIA DE MUESTRO:");
    Serial.println("PLACA: ARDUINO DUE");
    Serial.println("*****");
    for(byte i =0; i<10; i++){
        timel=micros();
        int A=analogRead(A0);
        time=micros()-timel;
        Serial.print(" Muestra: ");
        Serial.print(i+1);
        Serial.print(" Tiempo: ");
        Serial.println(time);
    }

}
```

Figura 20. Código ensayo de velocidad de muestreo.

Una vez ejecutado este código, en el monitor serial del software, que es donde se observa las acciones que realiza el programa definido en el entorno del Arudino IDE, se obtiene entonces que el tiempo de muestreo en microsegundos es de:

```
*****
ENSAYO FRECUENCIA DE MUESTRO:
PLACA: ARDUINO DUE
*****
Muestra: 1 Tiempo: 42
Muestra: 2 Tiempo: 6
Muestra: 3 Tiempo: 5
Muestra: 4 Tiempo: 6
Muestra: 5 Tiempo: 5
Muestra: 6 Tiempo: 5
Muestra: 7 Tiempo: 5
Muestra: 8 Tiempo: 5
Muestra: 9 Tiempo: 5
Muestra: 10 Tiempo: 5
```

Figura 21. Resultados Velocidad de Muestreo

Exceptuando la primera medición, se observa que el tiempo de muestreo es de 5 microsegundos lo que equivale a una frecuencia de muestreo de 200 kHz (comparado con los casi 9kHz de la placa Arduino UNO puede apreciarse entonces la gran diferencia de poder entre ambas placas), sin embargo esta velocidad de muestreo puede ser aún mayor si se cambian ciertos valores de inicio del procesador, limpieza de la memoria directa, y algunos factores de funcionamiento interno de la placa, en el capítulo 8 se incluye un enlace para elevar esta velocidad a 1MHz.

Sin embargo, esta no es la velocidad con que la placa puede tomar lecturas de los sensores que fueron utilizados. Esto es debido a varios factores entre los cuales se pueden destacar los siguientes:

- Velocidad de muestreo de los acelerómetros: esta es la principal limitante en cuanto a la toma de datos por segundo. La frecuencia de muestreo de los acelerómetros utilizados (como puede consultarse en el apartado de sensores) tienen frecuencias máximas de salida (sin la incorporación de elementos externos) de 550Hz.
- Convertidor Analógico Digital: en el código anterior no se está usando ninguna entrada analógica y por lo tanto el procesador no tiene que realizar ninguna conversión de señal lo que reduce el tiempo de ciclos o "loops" que puede ejecutar por unidad de tiempo.

Para determinar entonces cual es la máxima cantidad de datos por segundo que podemos obtener se realizaron 3 ensayos:

- Con velocidades de muestreo que van desde 1.000.000 datos por segundo hasta 1 dato por segundo se realizó una lectura "vacía" del pin analógico A0, es decir, lecturas analógicas sin ningún sensor conectado a la misma. (ver tabla 2).
- Con velocidades de muestreo que van desde 1.000.000 datos por segundo hasta 1 dato por segundo. Leyendo la entrada analógica del sensor ADXL 335. (ver tabla 3)
- Con velocidades de muestreo que van desde 1.000.000 datos por segundo hasta 1 dato por segundo. Leyendo la entrada digital usando protocolo I2C del sensor ADXL 345. (ver tabla 4)

*Tabla 2. Datos de muestreo sin sensor.*

sin sensor				
DelayMicrosecods	Datos esperados	Datos Obtenidos	Datos perdidos	% de perdido
1	1000000	1183	998817	99,8817
100	10000	1183	8817	88,17
1000	1000	960	40	4
10000	100	100	0	0
20000	50	50	0	0
25000	40	40	0	0
40000	25	25	0	0
50000	20	20	0	0
100000	10	10	0	0

*Tabla 3. Datos de muestreo con ADXL 335.*

Con ADXL 335				
DelayMicrosecods	Datos esperados	Datos Obtenidos	Datos perdidos	% de perdido
1	1000000	1074	998926	99,8926
100	10000	1074	8926	89,26
1000	1000	961	39	3,9
10000	100	97	3	3
20000	50	50	0	0
25000	40	40	0	0
40000	25	25	0	0
50000	20	20	0	0
100000	10	10	0	0

*Tabla 4. Datos de muestreo con ADXL 345.*

con ADXL 345				
DelayMicrosecods	Datos esperados	Datos Obtenidos	Datos perdidos	% de perdido
1	1000000	1484	998516	99,8516
100	10000	1484	8516	85,16
1000	1000	732	268	26,8
10000	100	100	0	0
20000	50	50	0	0
25000	40	40	0	0
40000	25	25	0	0
50000	20	20	0	0
100000	10	10	0	0

En la figura 22 se puede observar la comparación de delay en microsegundos vs % de datos perdido, donde se puede apreciar que existe una gran diferencia entre el ensayo de muestreo y las lecturas que se pueden obtener en la práctica. Esto es debido a que el ensayo de muestreo solo muestra la capacidad del microcontrolador para llevar a cabo las conversiones analógico-digital, mientras que en los ensayos de lecturas analógicas el puerto y la placa no solo tienen que realizar esta conversión si no recibir y enviar todos estos datos.

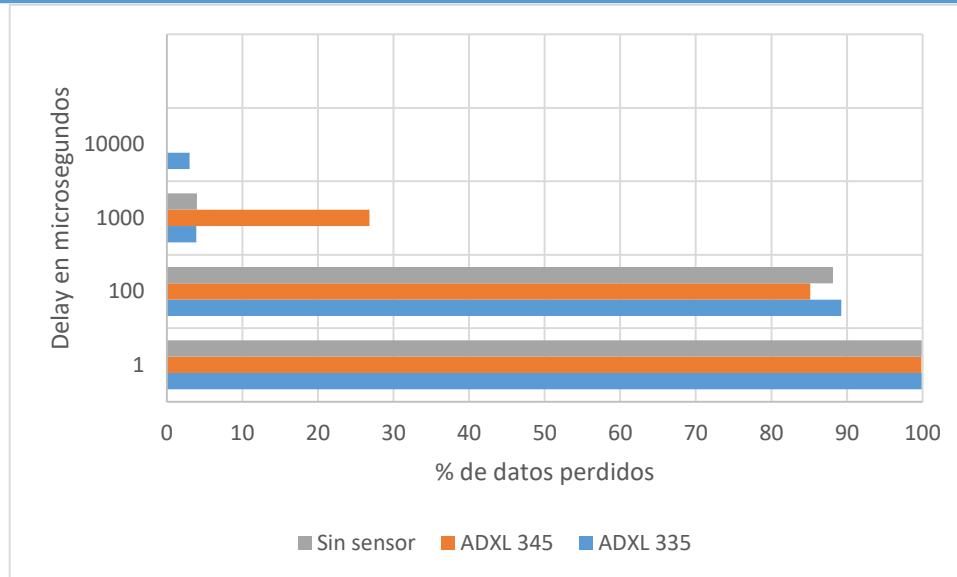


Figura 22. Cuadro comparativo de datos perdidos vs delay

Se puede observar que las velocidades de muestreo obtenidas en ambos acelerómetros son inferiores que las indicadas en las fichas técnicas respectivas. Sin embargo, la calidad de las señales obtenidas en estos ensayos no fue estudiada, ya que el objetivo de los mismos es determinar la velocidad de muestreo del microcontrolador y no de los acelerómetros. Por esta razón la frecuencia máxima usada en los ensayos de las Estructuras 1 y 2 se fijó en 550 Hz. Que resulto la velocidad de envío de datos máxima que recomienda el fabricante.

En base a los resultados de estos ensayos se recomienda que para la utilización de sensores analógicos no se usen delays por debajo de los 10000 microsegundos para evitar perdida de datos o lecturas incorrectas.

### 3.3.1.2. Resolución

Otro factor importante para la adquisición de datos es la resolución de la placa, es decir de los bits de resolución que tiene la misma, los bits permiten hacer combinaciones, cuanto más alto sea este número de bits mayor será el número de combinaciones posibles, cada una de estas combinaciones representa una medida del sistema analógico, la cantidad de medidas que tenemos será 2 elevado al número de bits de resolución. El Arduino Due posee un ADC de 12bits lo que equivale a 4096 combinaciones. No obstante, como se explica más adelante, la resolución del acelerómetro digital ADXL 345 es de 10-bits, es decir 1024 números enteros, por lo que por este lado la resolución vendrá limitada por el sensor y no por la placa.

No obstante existe un segundo factor que interviene en la resolución y es el rango de medida. El rango de voltaje de las placas Arduino varía entre 5 y 3.3 voltios, para el caso del Arduino Due el voltaje de trabajo interno es 3.3V. Con esto se puede determinar que la máxima resolución que puede alcanzar la placa es de:

$$Resolución = \frac{3.3V}{4096} = 0,805mV$$

Sin embargo, como se mencionó antes la resolución de uno de los sensores es de 10bits dando como máximo 1024 combinaciones por lo que la resolución real de este ensayo vendría dada por:

$$\text{Resolución} = \frac{3.3V}{1024} = 3,225mV$$

Que comparado con los 4,88mV de resolución que puede alcanzar el Arduino UNO representa una mejora de casi el 50%, pero comparado con la máxima resolución que puede alcanzar el Arduino Due representa casi un 75% de pérdida de resolución.

A continuación se obtiene la resolución de la placa experimentalmente usando el código mostrado en la figura 23. El esquema de instalación del circuito se muestra en la figura 24 y los resultados se muestran en la figura 25.

```

int contador;

void setup() {

    contador=1;
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("*****");
    Serial.println("ENSAYO RESOLUCION:");
    Serial.println("PLACA: ARDUINO DUE");
    Serial.println("*****");
}

void loop() {

    muestreo();
    contador++;
}

void muestreo() {

    int A=analogRead(A0);
    float B= float(A)*5/1023;
    Serial.print(" Muestra: ");
    Serial.print(contador);
    Serial.print(" Medida Digital: ");
    Serial.print(A);
    Serial.print(" Medida Analogica: ");
    Serial.println(B, 5);

    delay(1000);
}
    
```

Figura 23. Código ensayo de resolución Arduino Due.



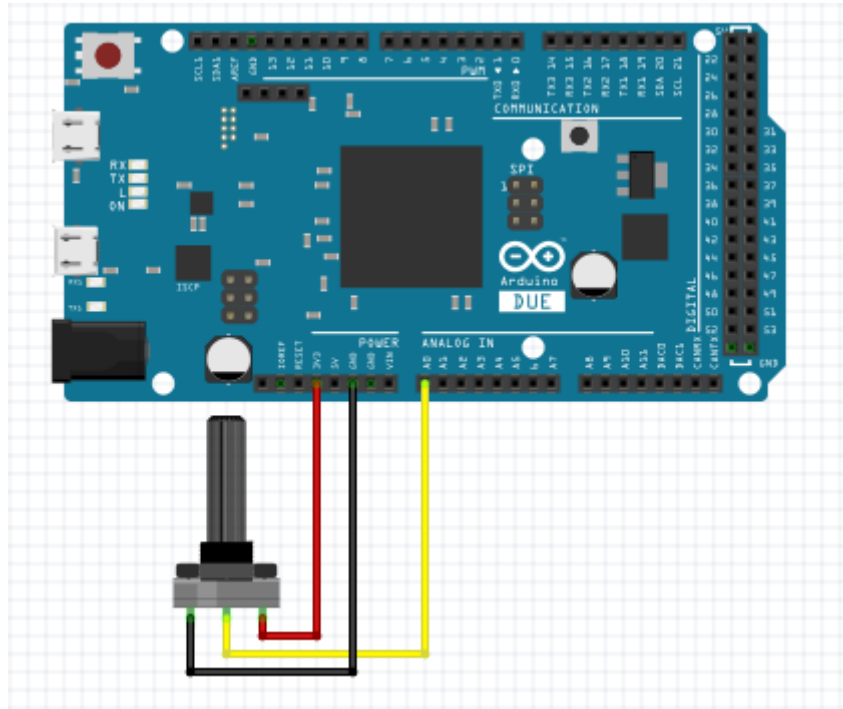


Figura 24. Esquema de conexión para ensayo de resolución.

```

*****
ENSAYO RESOLUCION
*****
Muestra: 1 Medida Digital: 4095 Medida Analogica: 3.30000
Muestra: 2 Medida Digital: 4095 Medida Analogica: 3.30000
Muestra: 3 Medida Digital: 4095 Medida Analogica: 3.30000
Muestra: 4 Medida Digital: 4094 Medida Analogica: 3.29919
Muestra: 5 Medida Digital: 4083 Medida Analogica: 3.29033
Muestra: 6 Medida Digital: 3857 Medida Analogica: 3.10821
Muestra: 7 Medida Digital: 3480 Medida Analogica: 2.80440
Muestra: 8 Medida Digital: 2569 Medida Analogica: 2.07026
Muestra: 9 Medida Digital: 2336 Medida Analogica: 1.88249
Muestra: 10 Medida Digital: 1989 Medida Analogica: 1.60286
Muestra: 11 Medida Digital: 2246 Medida Analogica: 1.80996
Muestra: 12 Medida Digital: 2243 Medida Analogica: 1.80755
Muestra: 13 Medida Digital: 2245 Medida Analogica: 1.80916
Muestra: 14 Medida Digital: 2348 Medida Analogica: 1.89216
Muestra: 15 Medida Digital: 2418 Medida Analogica: 1.94857
Muestra: 16 Medida Digital: 2555 Medida Analogica: 2.05897
Muestra: 17 Medida Digital: 2856 Medida Analogica: 2.30154
Muestra: 18 Medida Digital: 3456 Medida Analogica: 2.78505
Muestra: 19 Medida Digital: 3656 Medida Analogica: 2.94623
Muestra: 20 Medida Digital: 3657 Medida Analogica: 2.94703
Muestra: 21 Medida Digital: 3656 Medida Analogica: 2.94623

```

Figura 25. Resultados ensayo de resolución.

A partir de estos datos reales es posible determinar la resolución del microcontrolador al trabajar con 3,3V y 12-bits. Tomando dos mediciones consecutivas cualesquiera, por ejemplo 13 y 14, se obtiene que:

$$\text{Resolución} = \frac{|1.80916 - 1.89216|}{|2245 - 2348|} = 0,805 \text{ mV}$$



Se demuestra que la resolución teórica coincide con la real. Esta resolución es el mínimo voltaje que puede “interpretar” la placa. Esto es una variación de menos del 0,5% del voltaje de trabajo de Arduino lo que explica, como se puede observar en el apartado de calibración, porque existen variaciones en las lecturas estáticas del acelerómetro ADXL 335. Por esta razón para obtener mediciones más estables y con menos ruido se recomienda utilizar elementos que permitan mantener lo más estable posible el voltaje del circuito cuando se requiera de un mayor nivel de precisión.

Partiendo de este resultado y entendiendo que 0,805mV equivale a 1 LSB (Less Significant Bit, tiene que ver con la forma con que el programa lee la información enviada por el sensor), que corresponde al valor digital de la lectura, se puede entonces calcular la resolución en gravedades usando los datos de la calibración, si se observa la tabla 6 459 LSB representan 1g por lo tanto  $1g = 0,37V$ , es decir, una resolución de 0,002g o  $21,343mm/s^2$ .

Conocer la resolución y el rango de voltaje del microcontrolador permitiría entender que sensores (lowcost o profesionales) podrían ser usados con la misma y la resolución máxima que se lograrían obtener de estos.

### 3.3.2. ADXL335

El ADXL 335 es un pequeño y compacto acelerómetro de 3 ejes de bajo consumo. Con señal de voltaje de salida condicionada. Tiene un rango de  $\pm 3g$ , puede medir tanto la aceleración estática de la gravedad, para aplicaciones que requieran detección de inclinación, o la aceleración dinámica causada por golpes o vibraciones, es el caso de la presente investigación.

Tiene una salida de datos máxima de 550Hz sin elementos externos para los 3 ejes, y puede aumentarse hasta los 1600Hz para los ejes X y Y con la incorporación de capacitores al circuito.

Entre otras características se puede comentar que tiene una muy buena estabilidad frente a los cambios de temperatura con un rango de operación de entre  $-55^{\circ}C$  hasta  $125^{\circ}C$  con un cambio en la sensibilidad de  $\pm 0.01\%/^{\circ}C$ . Además de una buena resistencia física pudiendo soportar impactos de hasta 10.000g.

#### 3.3.2.1. Código:

Una de las ventajas de este acelerómetro es su simplicidad tanto en el código de comunicación con el Arduino, como su cableado físico. Como se puede observar en la figura 26 solo es necesario ejecutar la lectura del pin correspondiente al eje que se quiere leer. La transformación de este valor entero en aceleración se describe en el apartado de calibración.

```
//const int xpin = A0;           //Pin analógico del eje X
const int ypin = A1;           //eje Y
//const int zpin = A2;           //eje z

void setup() {

  Serial.begin(115200);
  analogReadResolution(12);      //Configuración de la resolución a 12-bits

}

void loop() {

  Serial.print(millis());        //Imprimir el tiempo
  Serial.print(",");
  Serial.println(analogRead(ypin)); //Imprimir valor entre 0-4095

  delayMicroseconds(1800);       //Varia con la velocidad de muestreo necesaria
}
```

Figura 26. Código de lectura simple ADXL 335

### 3.3.2.2. Conexión:

La conexión también resulta bastante sencilla. Como se muestra en la figura 25 es suficiente con 3 cables (en el caso de esta investigación, porque solo tomaremos medidas en el eje Y ya que el generador de aceleraciones en la base solo funciona en una dirección, por lo que no se esperan aceleraciones perpendiculares a este eje). Pero para obtener datos de los 3 ejes basta con agregar 2 cables de X y Z a cualesquiera entradas analógicas.

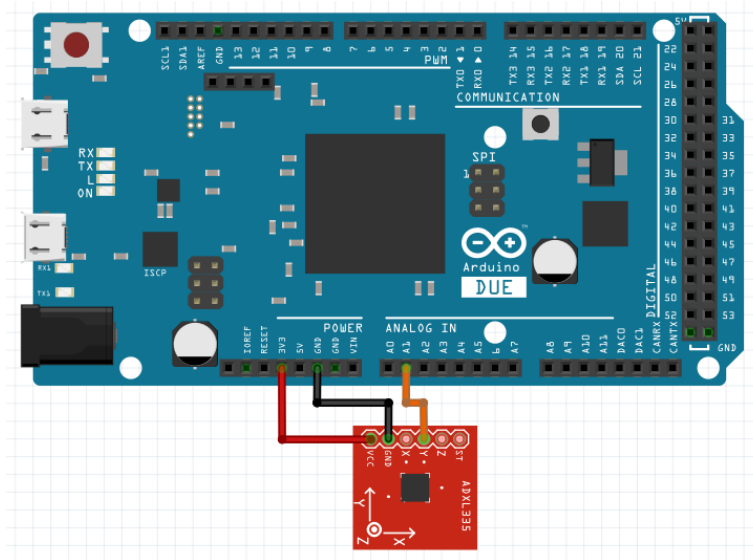


Figura 27. Esquema de conexión ADXL 335

### 3.3.2.3. Calibración:

Para la calibración se utilizó el código de la figura 28 y el esquema de la figura 29. Como se puede observar el objetivo de este código y del esquema es controlar las mediciones del acelerómetro para poder cambiarlo de posición según el método que se explicara a

continuación y de esta manera realizar de manera más sencilla la calibración correspondiente.

```
const int xpin = A0;           // Eje X del acelerómetro
const int ypin = A1;           // Eje Y
int switchPin = 2;             // Pin digital del boton
int reportData = 0;
int collectionPhase = 0;       // Numeración de los muestreos.

void setup()
{
  Serial.begin(57600);
  analogReadResolution(12);
  analogReference(AR_DEFAULT);

  pinMode(xpin, INPUT);
  pinMode(ypin, INPUT);
  pinMode(switchPin, INPUT);
}

void loop()
{
  // Almacena si el boton esta presionado o no:
  int val;
  val = digitalRead(switchPin);

  // Cuando el boton no esta presionado:
  if (val==HIGH) {
    if(reportData==1) {
      collectionPhase += 1;
      Serial.print("#Muestreo ");
      Serial.println(collectionPhase);
    }

    reportData = 0;
    delay(500);
  } else {

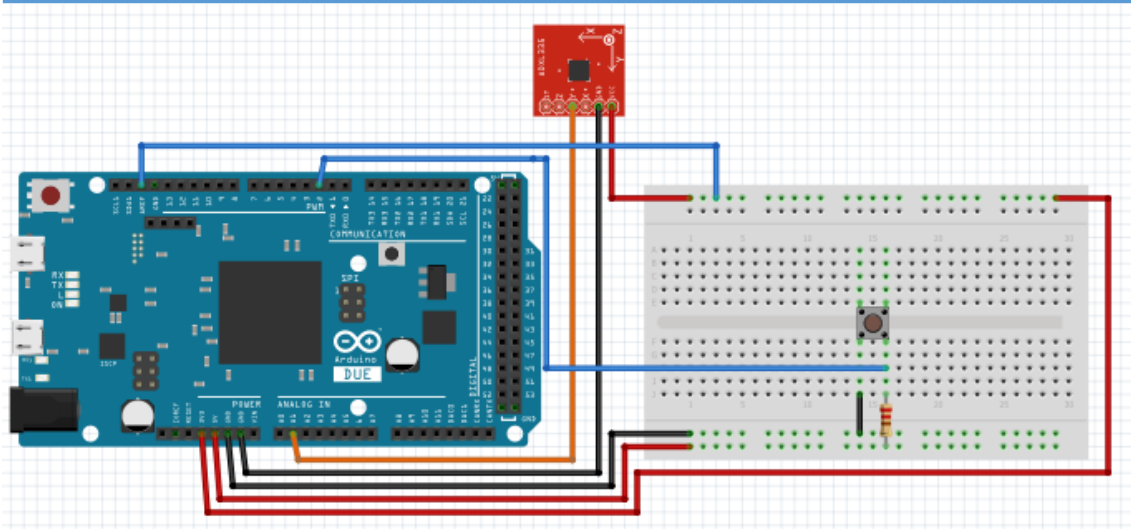
    // Cuando el boton esta presionado:
    reportData = 1;

    if(reportData>0) {
      // Lectura de los ejes.
      Serial.print( analogRead(xpin));
      Serial.print("\t");
      Serial.print( analogRead(ypin));
      Serial.println("\t");
    }

    delay(200);
  }
}
```

Figura 28. Código para calibración ADXL 335.

Cuando el botón no está presionado el circuito está abierto y la lectura del pin digital 2 es 1, es decir HIGH, y el programa ejecuta la primera declaración del condicional “if” y asigna un cero a la variable “reportData”. Si en cambio, el botón está presionado la lectura del pin digital 2 es LOW y por ende se ejecuta la segunda declaración del condicional “if”, es decir, la declaración entre corchetes del “else” y asigna un valor de 1 a la variable reportData. Una vez asignado este valor a la variable se ejecuta el segundo condicional, y se ejecutará mientras se cumpla la condición descrita en el argumento de la función, es decir, se obtendrán mediciones mientras el botón esté presionado, ya que la variable reportData tendrá un valor de 1.



*Figura 29. Esquema de conexión para calibración del ADXL 335*

En líneas generales la calibración se hizo usando la gravedad como referencia y siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- Ejecutar el código de la figura 28.
- Con ayuda de una mesa cuya planeidad se verificó con un nivel al igual que la perpendicularidad de sus caras, se procede a colocar el acelerómetro en una de sus caras alternando la orientación de los ejes X e Y de manera tal que primero se obtenga una lectura de 1g y luego una lectura de -1g. (ver figura 30)
- Para cada posición del acelerómetro se presionaba el botón y se obtenían 5 mediciones por orientación por eje. Los resultados de estas lecturas se recogen en la tabla 5.
- Luego se restaba el promedio de mediciones de 1g al promedio de mediciones de -1g de cada eje, obteniendo así la lectura correspondiente a 0g.
- Posteriormente restando los valores obtenidos de 1g y -1g con el valor esperado de 0g se obtiene el valor de cuantas unidades digitales (LSB) representa cada gravedad. Este valor se puede calcular de manera teórica dividiendo la cantidad de valores de la resolución de 12 bits entre 6g que es el rango total de gravedades del acelerómetro (desde -3g hasta 3g).
- Por ultimo para hallar el valor de aceleración en mm/s<sup>2</sup> se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Aceleración (mm/s}^2\text{)} = \frac{\text{Lectura} - 0g}{\text{Promedio } 1g - \text{Promedio } 0g} * 9810 \text{ mm/s}^2$$

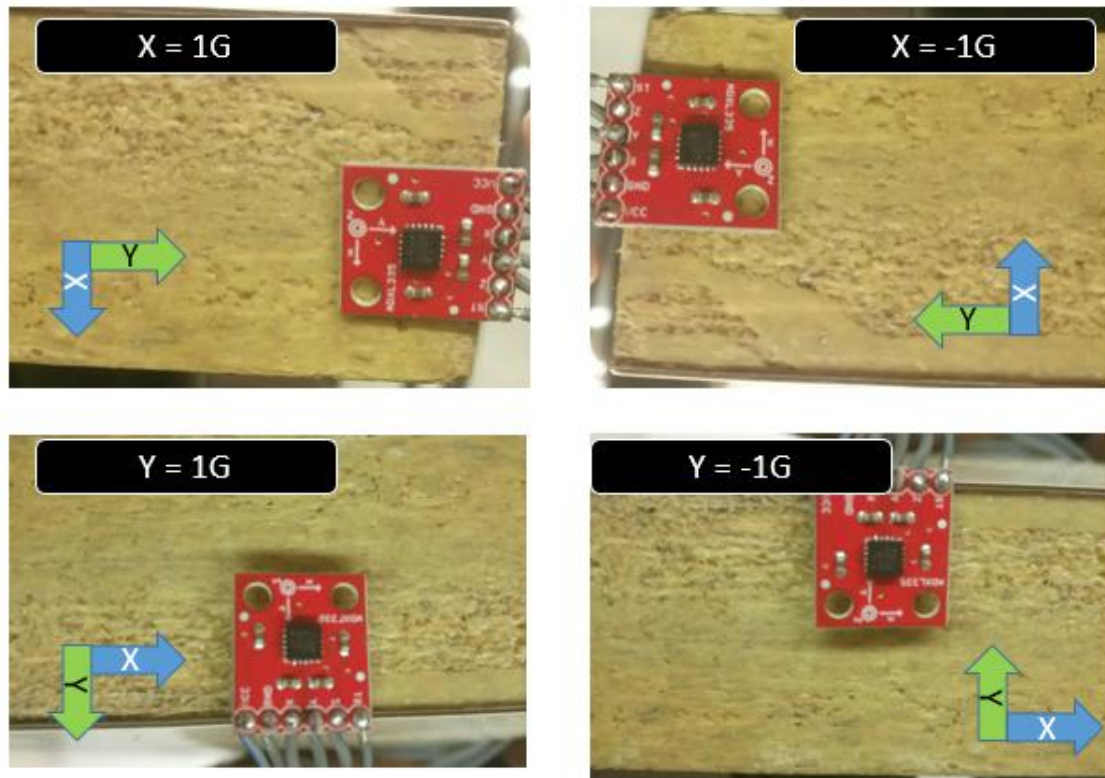


Figura 30. Direcciones de los ejes para calibración del sensor.

Tabla 5. Valores de calibración del ADXL335

	X = -1g	Y = 0g		X = 0g	Y = -1g
Muestreo #1	1597	1998	Muestreo #3	1980	1557
	1597	2010		1985	1583
	1596	2019		1988	1584
	1597	1997		1974	1588
	1593	1996		1982	1541
Promedio	1596	2004	Promedio	1981,8	1570,6
	X = 1g	Y = 0g		X = 0g	Y = 1g
Muestreo #2	2416	1972	Muestreo #4	2078	2486
	2411	1989		2075	2491
	2402	1973		2078	2499
	2412	2006		2070	2490
	2428	1976		2078	2476
Promedio	2413,8	1983,2	Promedio	2075,8	2488,4

Según lo explicado en el paso 3 podemos entonces comprar los valores de 0g leídos durante la calibración y los valores de 0g usando las lecturas de 1g y -1g. Esta comparación se recoge en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de 1g, 0g y -1g del ADXL 335

	Eje X	Eje Y
Lectura 1g	2413,8	2488,4
0g calculado	2004,8	2029,5
0g teórico	2048	2048
0g practico	2028,8	1993,6
Lectura -1g	1596	1570,6
Escala de cada g	409	458,9
Escala de cada g teorica	512	512

Las filas en azul fueron los valores utilizados para calcular las aceleraciones en los ensayos realizados a la Estructura 1.

Lo valores de 0g teórico y escala de cada g teórica son obtenidos sencillamente usando los valores de LSB que se pueden obtener usando una resolución de 12-bits, es decir, dividiendo 4096 entre 2 para el valor de 0g y 4096 entre 6 (ya que este acelerómetro posee un rango mínimo de  $\pm 3g$ ). Sin embargo, usando los valores obtenidos en la calibración si se calcula el rango máximo del sensor será:

$$Rango\ real = \frac{4096}{459} = 8,9g$$

Es decir,  $\pm 4,45g$ .

Se puede observar una diferencia notable entre los valores dados en la ficha técnica del acelerómetro y los obtenidos en la práctica. Para el eje X la diferencia entre el valor de escala de cada gravedad es un 20% mientras que para el eje Y es de casi 11%. Estas diferencias pueden ser debidas a muchas razones. En la ficha tecnica del ADXL 335 se especifica que para una temperatura de 25°C y un voltaje de trabajo de 3V el sensor debería ofrecer un rango de  $\pm 3.6G$ , sin embargo, como se explicó en el apartado del sistema de adquisición de datos, la placa utilizada funciona con 3.3V, esta diferencia de voltaje podría explicar la diferencia del rango del sensor. Por esta razón es importante siempre que se necesite tener valores reales de aceleración o gravedades llevar acabo la calibración correspondiente.

### 3.3.3. ADXL345

El ADXL 345 es un pequeño y compacto acelerómetro de 3 ejes de bajo consumo. Puede configurarse para obtener una resolución de 13-bits (12 de lectura, 4 por cada eje y 1 bit de escritura. Tiene un rango máximo de  $\pm 16g$ . Tiene un formato de salida digital accesible tanto por SPI (tanto con 3 o 4 cables) o protocolo I2C.

Puede medir tanto la aceleración estática de la gravedad para aplicaciones que requieran detección de inclinación o la aceleración dinámica causada por golpes o vibraciones. Su alta resolución (4mg/LSB) permite detectar cambios de inclinación de menos de 1.0°.

Además de las mediciones de aceleración este acelerómetro cuenta con varias funciones especiales. Puede establecerse nivel independiente para cada eje y el sensor detectara la falta o presencia de movimiento en base al nivel programado por el usuario. Detección de caída libre, configurable con uno o dos pines interruptores.



### 3.3.3.1. Código:

Como se mencionó anteriormente existen dos posibles formas de comunicación entre la placa y el acelerómetro, estas son: SPI e I2C, para esta investigación se usó la configuración de comunicación I2C. alguna de las ventajas de este protocolo es que resulta más fácil de programar y cablear, y aunque suele ser un poco más lenta la diferencia de resolución entre el sensor (10bits) y el Arduino Due (12bits), y la potencia del reloj interno de la placa compensan esta pequeña diferencia de velocidad sin pérdida de datos. Además permite la instalación de múltiples maestros y esclavos por lo que entender este protocolo permitiría desarrollar redes de monitorización más eficientes que con protocolo SPI, en el que solo se admite un maestro.

La librería “wire” del Arduino IDE permite interactuar con componentes conectados a través de I2C de manera relativamente sencilla. En la página 10 de la ficha de datos del fabricante explica cómo comunicarse con el sensor cuando se usa este protocolo.

En la figura 31 se muestra el diagrama de como las acciones “leer” y “escribir” deben ser ejecutadas. Primero se explicara cómo debe realizarse la acción de “escribir” básicamente por dos razones, primero es porque se debe ejecutar antes en el código y segundo porque es más fácil.

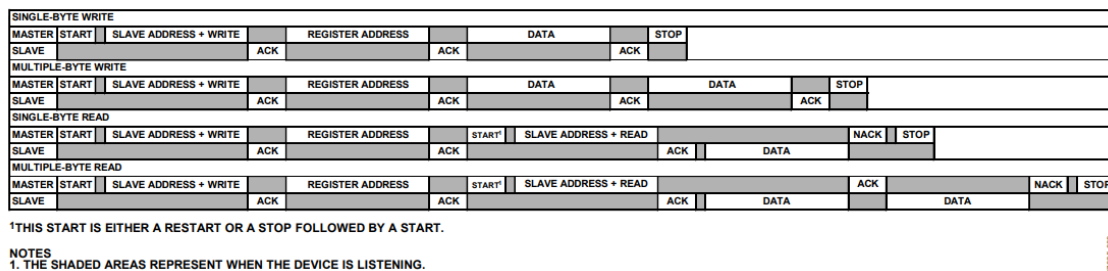


Figura 31. Diagrama de comunicación del dispositivo mediante protocolo I2C.

En el diagrama se puede observar que para llevar a cabo esta escritura tenemos que realizar los siguientes pasos:

- Iniciar transmisión hacia el sensor (usando la dirección de escritura), nótese que solo se utiliza la dirección del dispositivo “0x53” ya que el bit lectura/escritura es controlado por la librería “wire” del software Arduino Ide
- Escribir la dirección del registro en el que queremos escribir
- Escribir la información que queremos en el registro
- Terminar la transmisión

La programación de estos pasos se puede observar en la figura 31. Ahora con esta función es realmente sencillo escribir en los registros del sensor. Por ejemplo el registro para el encendido es 0x2D y la dirección del dispositivo es 0x53 (todas las direcciones, y registros de funciones del sensor, tanto en nomenclatura hexadecimal como en nomenclatura decimal, se pueden observar en la figura 32, figura extraída de la página 14 del datasheet del fabricante) así que si se quiere iniciar la secuencia de encendido solo se debe ejecutar la línea:

*WriteTo(0x53, 0x2D, 8);*

Teniendo definida la función de “escribir” se puede entonces pasar a la función de “leer”, esta función es un poco más larga pero usa una lógica parecida a la anterior por lo que no es difícil de definir. Esta vez se quiere ejecutar una lectura de múltiples bytes, a

diferencia de la función escribir en la que se enviaba un solo byte de escritura. En este caso se necesitan leer 6 bytes, 2 por cada eje (por sugerencia del fabricante), esto con el objetivo de evitar variaciones de datos mientras leemos los valores.

Address		Name	Type	Reset Value	Description
Hex	Dec				
0x00	0	DEVID	R	11100101	Device ID.
0x01 to 0x01C	1 to 28	Reserved			Reserved. Do not access.
0x1D	29	THRESH_TAP	R/W	00000000	Tap threshold.
0x1E	30	OFSX	R/W	00000000	X-axis offset.
0x1F	31	OFSY	R/W	00000000	Y-axis offset.
0x20	32	OFSZ	R/W	00000000	Z-axis offset.
0x21	33	DUR	R/W	00000000	Tap duration.
0x22	34	Latent	R/W	00000000	Tap latency.
0x23	35	Window	R/W	00000000	Tap window.
0x24	36	THRESH_ACT	R/W	00000000	Activity threshold.
0x25	37	THRESH_INACT	R/W	00000000	Inactivity threshold.
0x26	38	TIME_INACT	R/W	00000000	Inactivity time.
0x27	39	ACT_INACT_CTL	R/W	00000000	Axis enable control for activity and inactivity detection.
0x28	40	THRESH_FF	R/W	00000000	Free-fall threshold.
0x29	41	TIME_FF	R/W	00000000	Free-fall time.
0x2A	42	TAP_AXES	R/W	00000000	Axis control for tap/double tap.
0x2B	43	ACT_TAP_STATUS	R	00000000	Source of tap/double tap.
0x2C	44	BW_RATE	R/W	00001010	Data rate and power mode control.
0x2D	45	POWER_CTL	R/W	00000000	Power-saving features control.
0x2E	46	INT_ENABLE	R/W	00000000	Interrupt enable control.
0x2F	47	INT_MAP	R/W	00000000	Interrupt mapping control.
0x30	48	INT_SOURCE	R	00000010	Source of interrupts.
0x31	49	DATA_FORMAT	R/W	00000000	Data format control.
0x32	50	DATA0	R	00000000	X-Axis Data 0.
0x33	51	DATA1	R	00000000	X-Axis Data 1.
0x34	52	DATA0	R	00000000	Y-Axis Data 0.
0x35	53	DATA1	R	00000000	Y-Axis Data 1.
0x36	54	DATA0	R	00000000	Z-Axis Data 0.
0x37	55	DATA1	R	00000000	Z-Axis Data 1.
0x38	56	FIFO_CTL	R/W	00000000	FIFO control.
0x39	57	FIFO_STATUS	R	00000000	FIFO status.

*Figura 32. Mapa de registro del ADXL 345*

Si se vuelve a observar el diagrama de la figura 31 los pasos a seguir para realizar una lectura de múltiples bytes son:

- Iniciar transmisión hacia el sensor (usando la dirección de escritura), nuevamente solo se utiliza la dirección del dispositivo "0x53" ya que el bit lectura/escritura es controlado por la librería "wire" del software Arduino Ide
- Escribir la dirección del registro que queremos empezar a leer. Cuando se realizan lecturas de múltiples bytes (o escritura) se proporciona la dirección de inicio y el número de bytes que queremos leer.
- Iniciar transmisión hacia el sensor (usando la dirección de escritura), nuevamente solo se utiliza la dirección del dispositivo "0x53" ya que el bit lectura/escritura es controlado por la librería "wire" del software Arduino Ide
- Leer un byte tras otro
- Finalizar transmisión.

La programación de estos pasos se puede observar en la figura 30. Los nuevos comandos, con respecto a la función de escritura son:

- Wire.requestFrom(device,num) – Solicita "num" números de bytes del dispositivo. La lectura empieza con el llamado del registro enviado con la función Wire.write()
- Wire.available()- Devuelve "verdadero" si existe algo que leer desde el sensor



- Wire.read()- Lee un byte desde el sensor

La función readFrom() básicamente sigue los pasos listados arriba. Es importante notar que el resultado de esta función es almacenado en el “buff array” y no es devuelto por la función, por lo que es necesario pasar la cadena a la función y tener la longitud necesaria para mantener el valor.

Habiendo definido estas dos funciones se procedió a escribir el código con el que fue programado el Arduino Due para la adquisición de datos. En la figura 33 se puede observar el código completo.

```
#include <Wire.h>

#define DEVICE (0x53)    //ADXL345 dirección del dispositivo
#define TO_READ (6)     //número de bytes que se van a leer cada ciclo (2 bytes por eje)

byte buff[TO_READ];     //un buffer de 6 bytes para leer desde el sensor
char str[512];          //"string buffer" para transformar la información antes de enviarla al puerto serial

void writeTo(int device, byte address, byte val) {
    Wire.beginTransmission(device); //inicia transmisión al dispositivo
    Wire.write(address);           // enviar dirección de registro
    Wire.write(val);               // enviar el valor a escribir
    Wire.endTransmission(); //terminar la transmisión
}

void readFrom(int device, byte address, int num, byte buff[]) {
    Wire.beginTransmission(device); //inicia transmisión al dispositivo
    Wire.write(address);           //enviar dirección desde la cual se va a leer
    Wire.endTransmission(); //terminar la transmisión

    Wire.beginTransmission(device); //inicia nuevamente la transmisión al dispositivo
    Wire.requestFrom(device, num); //solicitar 6 byte desde el dispositivo

    int i = 0;
    while(Wire.available()) //el dispositivo puede enviar menos de lo solicitado
    {
        buff[i] = Wire.read(); // recibir byte
        i++;
    }
    Wire.endTransmission(); //finalizar transmisión
}

void setup()
{
    Wire.begin(); // inicia la comunicación por I2C (dirección del "master" opcional)
    Serial.begin(9600);

    //Turning on the ADXL345
    writeTo(DEVICE, 0x2D, 0);
    writeTo(DEVICE, 0x2D, 16);
    writeTo(DEVICE, 0x2D, 8);
    //char POWER_CTL = 0x2D;

}

void loop()
{
    int regAddress = 0x32; //Primer valor del eje registrado en el sensor
    int x, y, z;

    readFrom(DEVICE, regAddress, TO_READ, buff); //Leer aceleracion del sensor

    //convertir 2 byte de cada eje en una variable int
    x = (((int)buff[1]) << 8) | buff[0];
    y = (((int)buff[3]) << 8) | buff[2];
    z = (((int)buff[5]) << 8) | buff[4];

    //enviar valores de aceleracion al puerto serial
    sprintf(str, "%d %d %d", x, y, z);
    Serial.print(str);
    Serial.write(10);
    delay(15);
}
```

a)

b)

Figura 33. Código de lectura sin librerías del ADXL 345. A) definición de la función “escribir” en el dispositivo. B) definición de la función “leer” desde el dispositivo.

En el void setup() se puede observar que se escriben tres valores diferentes en la misma dirección del registro de encendido. El primer valor se resetea dicho registro, luego se coloca en modo de espera y por último se activa el modo “medida”. Esto se realizó siguiendo las recomendaciones de la ficha técnica del fabricante, sin embargo, se podría simplemente ejecutar la última línea asignando un valor de “8” al registro. Es importante

decir que si no se asigna este valor el sensor quedaría en modo de espera y solo devolvería valores de medición iguales a cero.

Es verdad que existen librerías que permiten una comunicación con el sensor mucho más sencilla y corta. En la imagen 34 se muestra un código sencillo de lectura usando librerías para el acelerómetro ADXL 345 desarrollada por otros usuarios. Sin embargo, la programación de un sensor sin librerías permite entender la “lógica” del sensor y cuáles son los pasos que sigue el mismo para funcionar.

```
#include <Wire.h>
#include <SparkFun_ADXL345.h>

ADXL345 adxl = ADXL345();

int x, y, z;

void setup()
{
    Serial.begin(115200);

    adxl.powerOn();           //Encendido del senso
    adxl.setRangeSetting(4);  //Definir el rango, valores 2g, 4g, 8g o 16g
}

void loop()
{
    adxl.readAccel(&x, &y, &z);

    Serial.print(millis());
    Serial.print(",");
    //Serial.print(x);
    //Serial.print(",");
    Serial.println(y);
    delayMicroseconds(25000);
}
```

Figura 34. Código de lectura usando librerías para el ADXL 345.

En este caso las funciones “escribir” (WriteTo) y “leer” (ReadTo) están definidas en la librería dentro de la función definida como “readAccel” por lo que usuarios sin experiencia en programación podrían ser capaces de obtener lecturas gruesas del acelerómetro sin mayor dificultad.

Ambos códigos fueron probados previamente para determinar si alguno presentaba ventajas con respecto al otro pero el número de datos por segundo fue el mismo en ambos casos, por lo que en la mayoría de los casos se utilizó el de la figura 34 por comodidad.

Es importante comentar que en ambos casos el “delay” era variado en base a los requerimientos de la lectura en cuestión.

### 3.3.3.2. Conexión:

A continuación se muestra como se llevó a cabo la conexión utilizando el protocolo I2C. Es importante destacar que para algunas funciones de detección especiales es necesario agregar una resistencia y agregar al esquema una salida del pin SDO conectada a tierra.

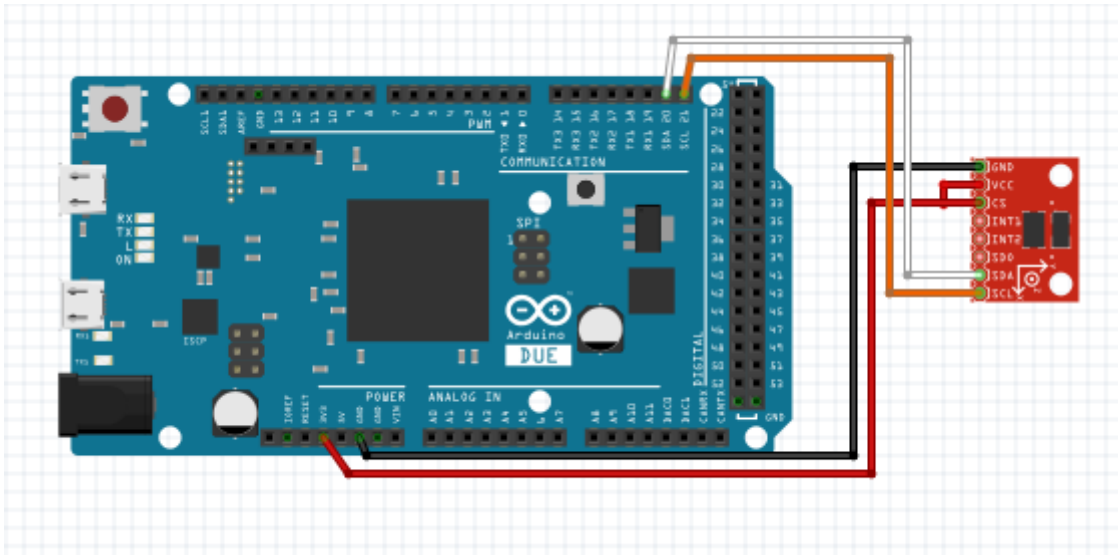


Figura 35. Esquema de conexión del ADXL 345 usando I2C.

### 3.3.3.3. Calibración:

Para la calibración se siguió un procedimiento parecido al del acelerómetro ADXL 335, sin embargo, manipular el voltaje de este acelerómetro no es tan sencillo como el anterior ya que el pin “CS” (ChipSelect) debe estar conectado a la salida de voltaje todo el tiempo o el Arduino no detectara el sensor y no sabría en qué dirección ejecutar las funciones de “leer” y “escribir”. Se utilizó el código de la figura 36 y el esquema de la figura 35. Como se puede observar el objetivo de este código y del esquema es controlar las mediciones del acelerómetro para poder cambiarlo de posición siguiendo el método que se explica a continuación y de esta manera realizar de forma más sencilla la calibración correspondiente.

En líneas generales la calibración se hizo usando la gravedad como referencia y siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- Ejecutar el código de la figura 36.
- Con ayuda de una mesa cuya planeidad se verificó con un nivel al igual que la perpendicularidad de sus caras, se procede a colocar el acelerómetro en una de sus caras alternando la orientación de los ejes X e Y de manera tal que primero se obtenga una lectura de 1g y luego una lectura de -1g (de la misma manera que lo realizado para el ADXL 335, puede consultarse la imagen 30 del apartado anterior).
- Para cada posición del acelerómetro se presionaba una tecla cualquiera del teclado y se obtenían 5 mediciones por orientación por eje. Los resultados de estas lecturas se recogen en la tabla 7.

- Luego se restaba el promedio de mediciones de 1g al promedio de mediciones de -1g de cada eje, obteniendo así la lectura correspondiente a 0g.
- Posteriormente restando los valores obtenidos de 1g y -1g con el valor esperado de 0g se obtiene el valor de cuantas unidades digitales (LSB) representa cada gravedad. Este valor se puede calcular de manera teórica dividiendo la cantidad de valores de la resolución de 10 bits entre 8g que es el rango total de gravedades del acelerómetro (desde -4g hasta 4g).
- Por último para hallar el valor de aceleración en mm/s<sup>2</sup>. Para ellos se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Aceleración (mm/s}^2\text{)} = \frac{\text{Lectura} - 0g}{\text{Promedio } 1g - \text{Promedio } 0g} * 9810 \text{ mm/s}^2$$

```
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <SparkFun_ADXL345.h>

ADXL345 adxl = ADXL345();
int x, y, z;
int collectionPhase = 0;
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    adxl.powerOn();
    adxl.setRangeSetting(4); //Definir el rango, valores 2, 4, 8 o 16
}
void loop()
{
    Serial.println(" ");
    Serial.println("Pulse una tecla ");
    Serial.println(" ");
    while (!Serial.available()){ // wait for a character
        collectionPhase += 1;
        Serial.print("#Muestreo ");
        Serial.println(collectionPhase);
        adxl.readAccel(&x, &y, &z);
        Serial.print(x);
        Serial.print(",");
        Serial.println(y);
        delayMicroseconds(200000);
        Serial.print(x);
        Serial.print(",");
        Serial.println(y);
        delayMicroseconds(200000);
        Serial.print(x);
        Serial.print(",");
        Serial.println(y);
        delayMicroseconds(200000);
        Serial.print(x);
        Serial.print(",");
        Serial.println(y);
        while (Serial.available())
        {
            Serial.read(); // clear the input buffer
        }
    }
}
```

Figura 36. Código para Calibración del ADXL 345

Tabla 7. Valores de calibración para el ADXL 345

	X = -1g	Y = 0g		X = 0g	Y = -1g
Muestreo #1	-121	11	Muestreo #3	9	-126
	-121	11		9	-126
	-121	11		9	-126
	-121	11		9	-126
	-121	11		9	-126
Promedio	-121	11	Promedio	9	-126
	X = 1g	Y = 0g		X = 0g	Y = 1g
Muestreo #2	143	6	Muestreo #4	9	138
	143	6		9	138
	143	6		9	138
	143	6		9	138
	143	6		9	138
Promedio	143	6	Promedio	9	138

Según lo explicado en el paso 3 podemos entonces comprar los valores de 0g leídos durante la calibración y los valores de 0g usando las lecturas de 1g y -1g. Esta comparación se recoge en la tabla 8.

Tabla 8. Valores de 1g, 0g y -1g del ADXL 345

	Eje X	Eje Y
Lectura 1g	143	138
0g calculado	11	6
0g teorico	0	0
0g practico	9	8,5
Lectura -1g	-121	-126
Escala de cada g	132	132
Escala de cada g teorica	128	128

Las filas en azul fueron los valores utilizados para calcular las aceleraciones en los ensayos realizados a la estructura 1.

Lo valores de 0g teórico y escala de cada g teórica son obtenidos sencillamente usando los valores de LSB que se pueden obtener usando una resolución de 10-bits, es decir, 1024 entre 8 (ya que se configuro el acelerómetro para trabajar en un rango de  $\pm 4g$ ), para la lectura de 0g es 0 LSB. Este acelerómetro a diferencia del ADXL 335 devuelve enteros entre - 512 y 511 siendo "0" la mitad del rango total.

Se puede observar una diferencia entre los valores dados en la ficha técnica del acelerómetro y los obtenidos en la práctica. Tanto para el eje X como para el eje Y la diferencia entre el valor de escala de cada gravedad es un 3%.

Si se comparan los resultados de calibración entre ambos acelerómetros se pueden destacar 2 cosas importantes:



- Primero: las lecturas obtenidas en estado de reposo del ADXL 345 son mucho más consistentes y no presentan variación con respecto a las obtenidas con el ADXL 335
- Segundo: la diferencia entre los valores esperados y los valores obtenidos es mucho menor que las conseguidas por el ADXL 335

### 3.3.4. Generador de movimientos en la base

Para generar movimientos armónicos en la base de la estructura 1 se utilizó un set compuesto de 3 instrumentos:

- Generador de barrido: de la casa Krohn Hite modelo 1200A. Puede generar ondas sinusoidales, cuadradas o triangulares con un rango de frecuencias de 0,2Hz hasta 300MHz. Ver imagen 34.



*Figura 37. Imagen referencial del generador de barrido 1200A.*

- Amplificador de ondas: Sinmarc EP 300 m mos-fet. Información no disponible.



*Figura 38. Amplificador de señal.*

- Tambor electromecánico: al igual que un alta voz de bajas frecuencias va conectado al amplificador y reproduce las ondas enviadas por el generador de barridos, este a su vez va conectado a la base de la Estructura 1 permitiendo excitarla con frecuencias conocidas. Información no disponible.

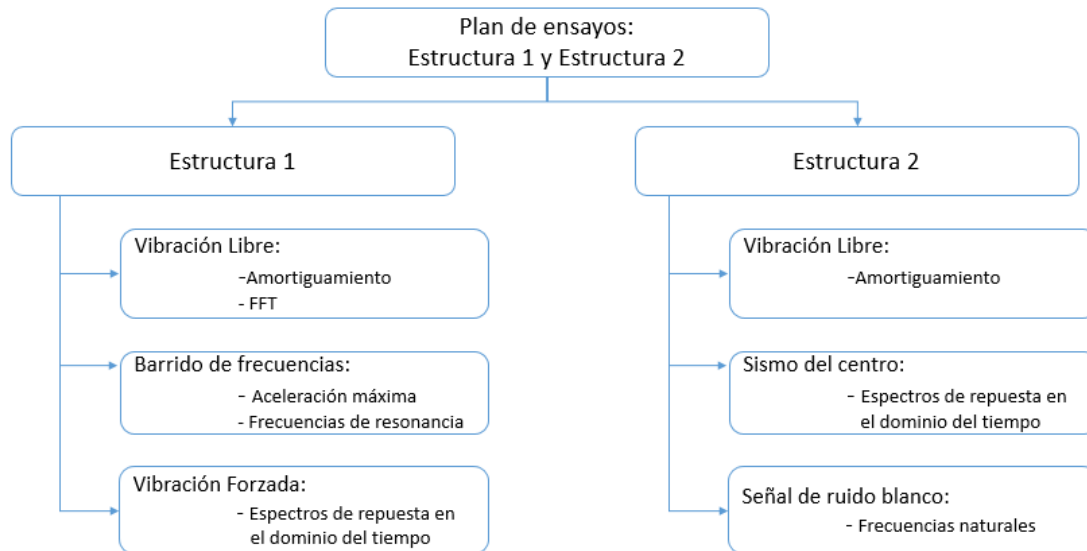


Figura 39. Tambor electromecánico de la marca Bruel Kjaer.



### 3.4. Plan de ensayo

En este apartado se explica la planificación de ensayos y pruebas a realizar tanto en la Estructura 1 como en la Estructura 2 y el objetivo de los mismos. En la figura 40 se puede observar la planificación de la campaña experimental.



*Figura 40. Plan de ensayos para las estructuras 1 y 2*

#### 3.4.1. Ensayo de vibración libre Estructura 1.

Para la realización de este ensayo se excitó la estructura con su frecuencia natural para alcanzar la mayor amplitud y luego se interrumpió la señal bruscamente apagando el generador de barrido y dejándola vibrar libremente hasta el reposo.

Las condiciones de contorno aplicadas fueron:

- Pilares empotrados en la base
- Base todavía anclada al actuador. De esta manera se evitaba que al excitar la estructura manualmente existiera desplazamiento de la base sobre los rieles, ya que esto influiría en el cálculo del amortiguamiento.
- Ninguna carga externa al movimiento de la base fue aplicada.

Los objetivos de esta prueba son:

- Fracción de amortiguamiento crítico de la estructura.
- Comprobación de frecuencias naturales.

En la tabla 9 se recoge la metodología para la toma de datos que se llevó acabo en este ensayo. Y la nomenclatura con la que se presentan los resultados.

Tabla 9. Tabla resumen de resultados de ensayo de vibración libre de la Estructura 1.

Ensayo: Vibración libre			
Acelerómetro ADXL 335		Acelerómetro ADXL 345	
Velocidad de muestreo	Número de figura	Velocidad de muestreo	Número de figura
10	41	10	45
20	42	50	46
50	43	500	47
550	44		

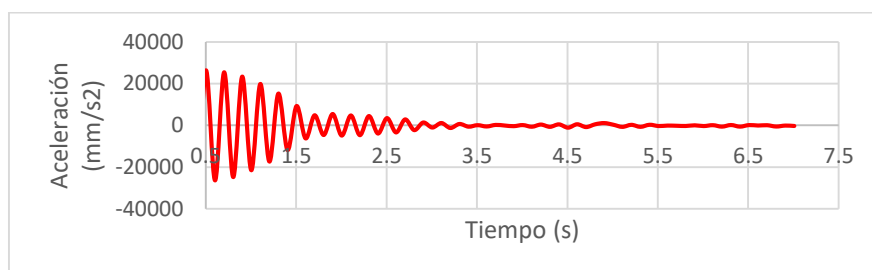


Figura 41. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 335 a 10 datos por segundo.

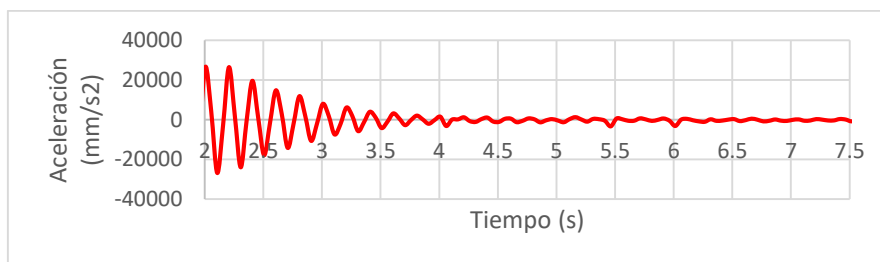


Figura 42. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 335 a 20 datos por segundo.

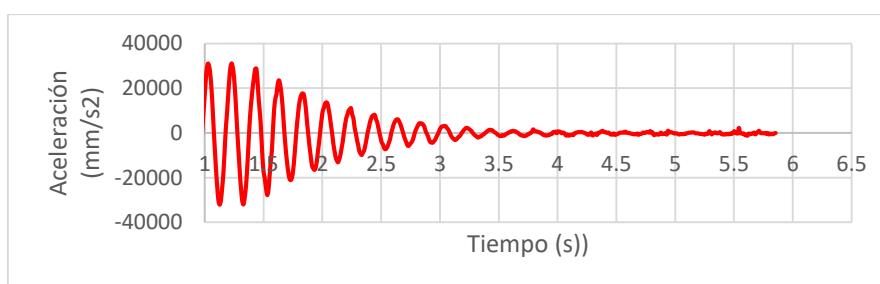


Figura 43. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 335 a 50 datos por segundo.

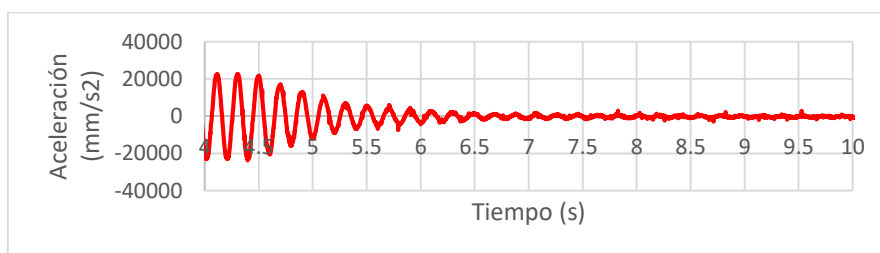


Figura 44. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 335 a 550 datos por segundo.

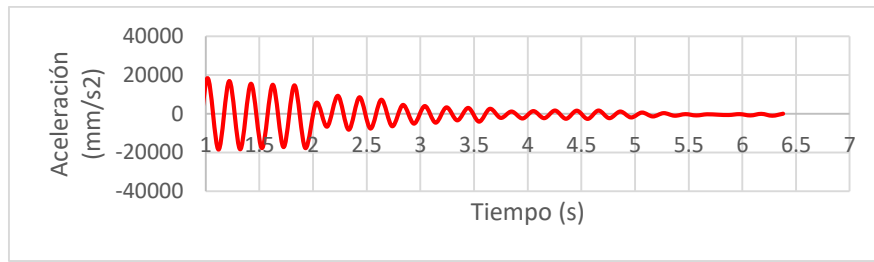


Figura 45. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 345 a 10 datos por segundo.

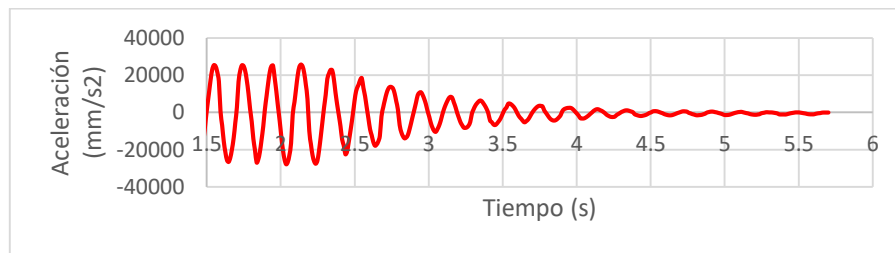


Figura 46. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 345 a 50 datos por segundo.

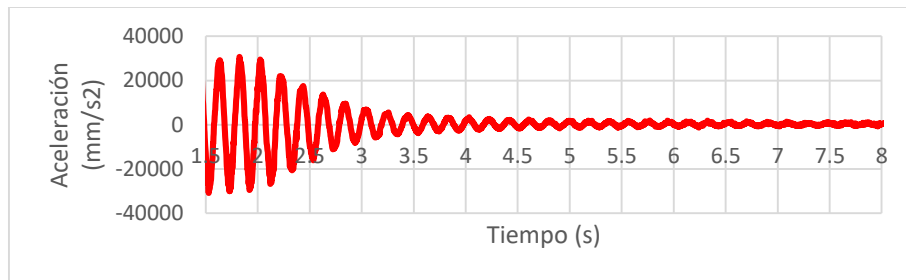


Figura 47. Vibración libre de la Estructura 1. Con el ADXL 345 a 500 datos por segundo.

Usando la fórmula de decremento logarítmico planteada a continuación se halló el amortiguamiento crítico para cada caso.

$$\zeta = \frac{\ln\left(\frac{C_I}{C_{II}}\right)}{\sqrt{4\pi^2 n^2 + \left(\ln\left(\frac{C_I}{C_{II}}\right)\right)^2}}$$

Donde:

- $\zeta$  = porcentaje de amortiguamiento crítico
- $C_I$  y  $C_{II}$  = picos de la señal
- $n$  = número de ciclos entre picos

En la tabla 10 se pueden observar las coordenadas de los puntos seleccionados y el resultado del amortiguamiento para cada velocidad de muestreo utilizando el ADXL 335, mientras que en la 11 se muestran los resultados del ADXL 345.

*Tabla 10. Amortiguamiento usando el ADXL 335*

Velocidad de muestreo	Punto 1		Punto 2		Numero de clicos entre puntos	Amortiguamiento (%)
	Tiempo (s)	Aceleración (mm/s <sup>2</sup> )	Tiempo (s)	Aceleración (mm/s <sup>2</sup> )		
10	0,502	26.393	1,504	9.239	5	3,339
20	2,005	26.513	3,608	3.073	9	3,808
50	1,228	31.023	2,646	5.736	7	3,835
550	4,312	21.930	5,712	4.057	7	3,834

*Tabla 11. Amortiguamiento usando el ADXL 345*

Velocidad de muestreo	Punto 1		Punto 2		Numero de clicos entre puntos	Amortiguamiento (%)
	Tiempo (s)	Aceleración (mm/s <sup>2</sup> )	Tiempo (s)	Aceleración (mm/s <sup>2</sup> )		
10	2,029	25.863	3,243	5.723	6	3,998
20	2,231	9.215	3,648	2.527	7	2,941
50	2,148	24.748	4,181	2.223	10	3,833
550	2,033	28.835	3,648	3.419	9	3,768

Para el modelo numérico se usó el promedio de todos los ensayos de vibración libre obtenidos con ambos acelerómetros. Dicho valor es: 3,774%.

Adicionalmente utilizando los datos de este ensayo se hallaron las frecuencias naturales del sistema para ellos se utilizó la transformada rápida de Fourier o FFT por sus siglas en inglés (Fast Fourier Transform). Estas frecuencias también fueron obtenidas siguiendo el mismo procedimiento pero con barrido de señal aleatoria como se explicara más adelante.

Los resultados de esta experiencia son comparados en los gráficos 48 para el acelerómetro ADXL 335 y 49 para el acelerómetro ADXL 345, cada línea representa una velocidad de muestreo diferente.

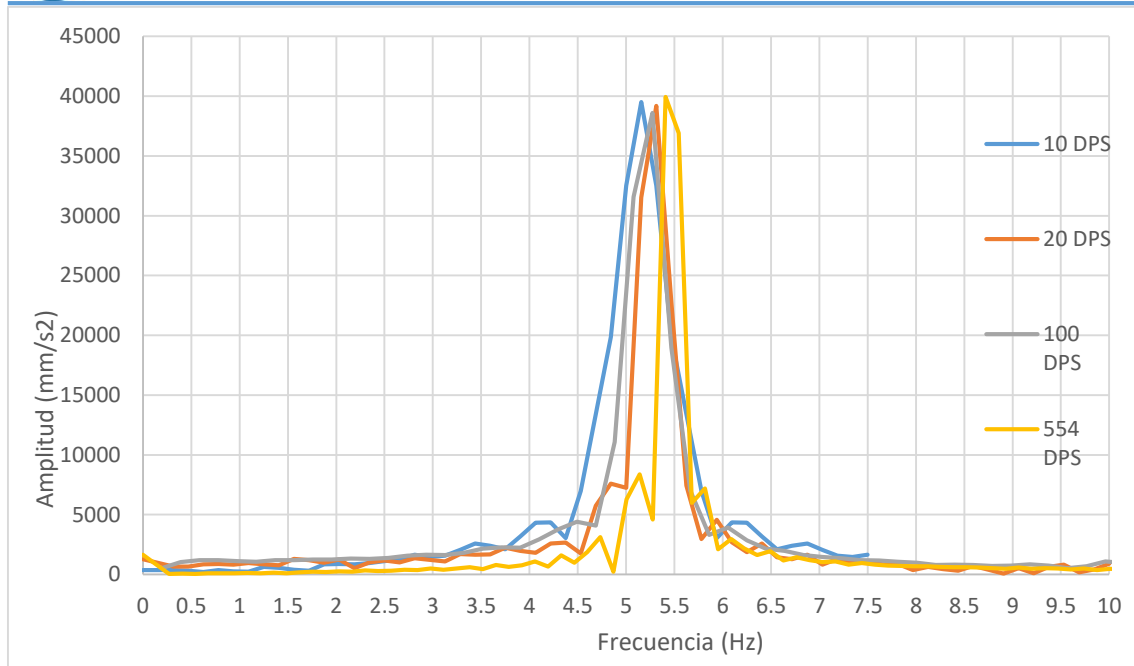


Figura 48. Espectro de frecuencia para las diferentes velocidades de muestreo (DPS) usando el ADXL 335.

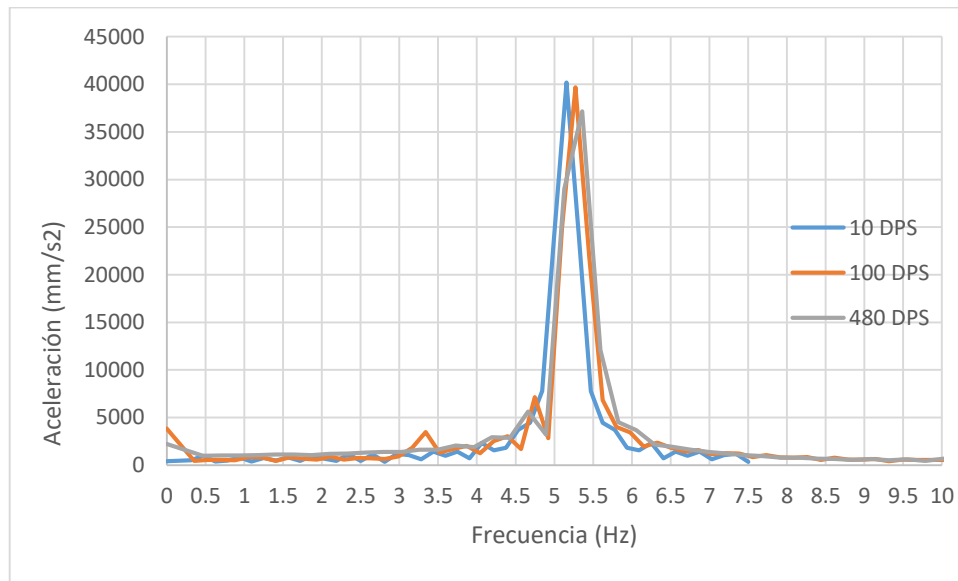


Figura 49. Espectro de frecuencia para las diferentes velocidades de muestreo (DPS) usando el ADXL 345.

En la tabla 12 se resume las gráficas anteriores indicando el punto de mayor amplitud y su respectiva ordenada en frecuencia.

*Tabla 12. Valores de puntos de máxima amplitud.*

Acelerometro	Velocidad de muestreo	Frecuencia (Hz)	Amplitud (mm/s <sup>2</sup> )
ADXL 335	10	5,2	39506
	20	5,3	39184
	100	5,3	38602
	550	5,4	39939
ADXL 345	10	5,2	40184
	100	5,3	39684
	500	5,4	37169

Se puede observar que en cuanto a las frecuencias hay una diferencia máxima de 4,7% mientras que en las amplitudes esta diferencia es mayor alcanzando un valor máximo de 33%. Estos resultados se discuten con mayor detalle en el capítulo 5.

### 3.4.2. Ensayo vibración libre Estructura 2

Para la realización de este ensayo se excitó la estructura de manera manual en una sola dirección con la mesa vibratoria fija en la posición 0,0 y dejándola vibrar libremente hasta el reposo.

Las condiciones de contorno aplicadas fueron:

- Pilares empotrados en la base
- Base fija.

Los objetivos de esta prueba son:

- Fracción de amortiguamiento crítico de la estructura.
- Comprobación de frecuencias naturales.

Para esta prueba se realizaron 3 ensayos en cada dirección (X e Y) y con cada acelerómetro, para un total de 12 ensayos de vibración libre. En la tabla.

En las figuras 50, 51 y 52 se pueden observar los resultados en la dirección X obtenidos con el acelerómetro ADXL345, así mismo las figuras 53, 54 y 55 corresponden a los resultados del ADXL 335.

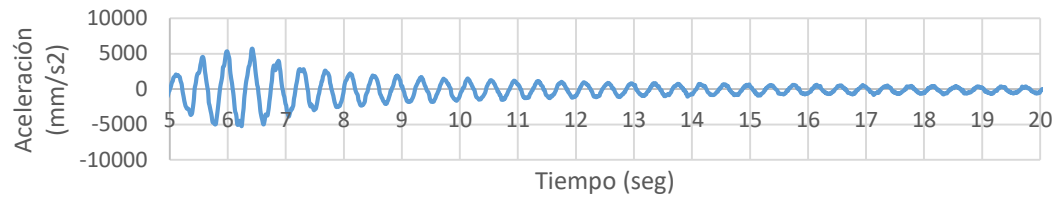


Figura 50. Ensayo vibración libre 1: Dirección X, ADXL345.

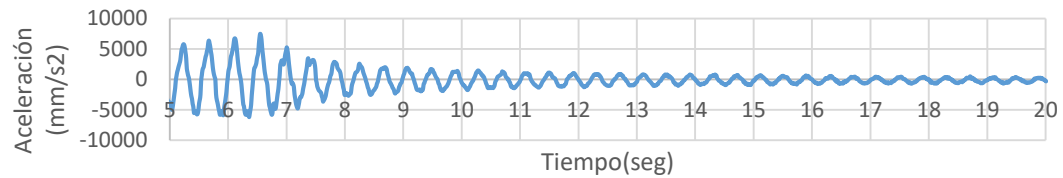


Figura 51. Ensayo vibración libre 2: Dirección X, ADXL345.

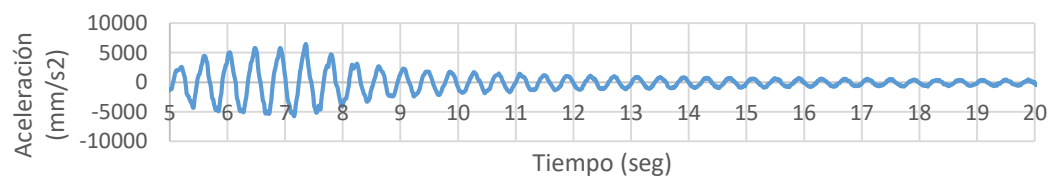


Figura 52. Ensayo vibración libre 3: Dirección X, ADXL345.

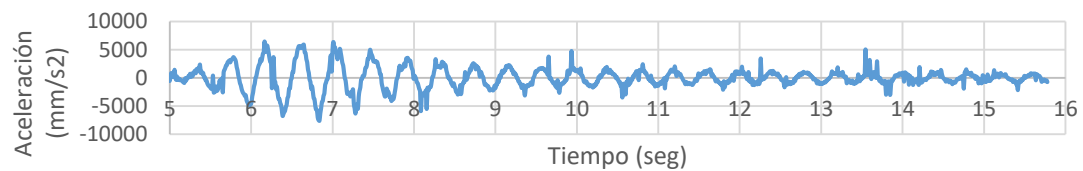


Figura 53. Ensayo de vibración libre 4: Dirección X, ADXL335.

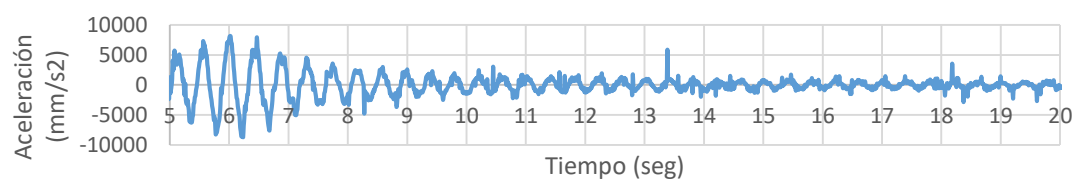


Figura 54. Ensayo de vibración libre 5: Dirección X, ADXL335.

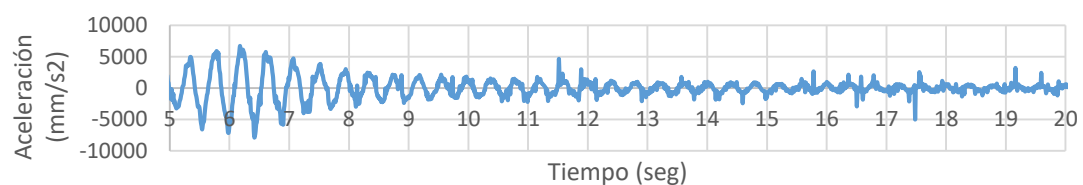


Figura 55. Ensayo de vibración libre 6: Dirección X, ADXL335.

De la misma manera en las figuras 56, 57 y 58 se pueden observar los resultados en la del acelerómetro ADXL 345 pero esta vez para la dirección Y mientras las figuras 59, 60 y 61 representan los resultados del sensor ADXL 335.

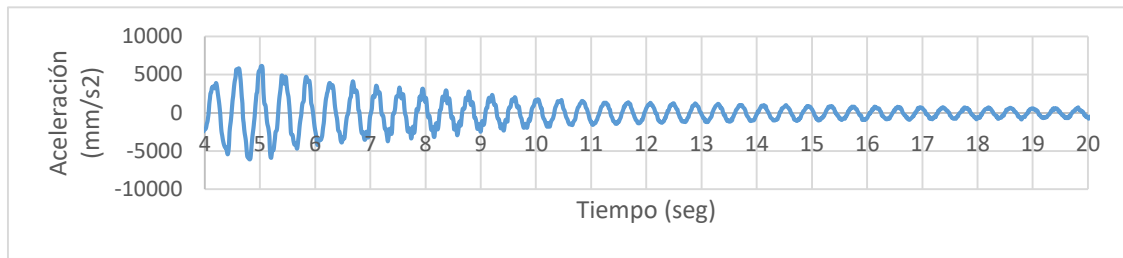


Figura 56. Ensayo de vibración libre 7: Dirección Y, ADXL345.

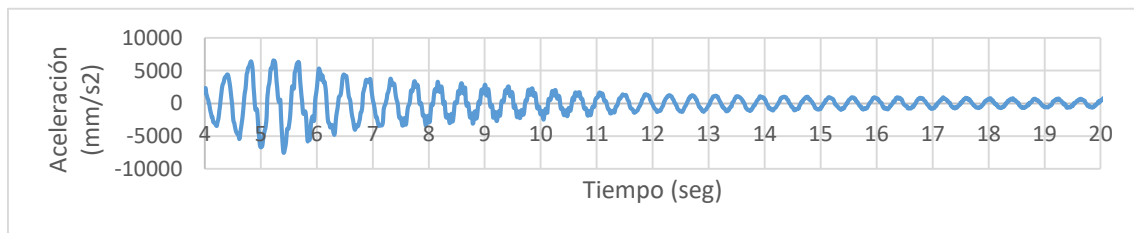


Figura 57. Ensayo de vibración libre 8: Dirección Y, ADXL345

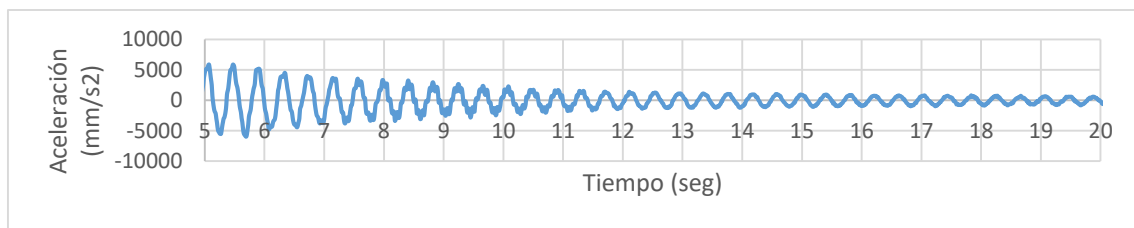


Figura 58. Ensayo de vibración libre 9: Dirección Y, ADXL345.

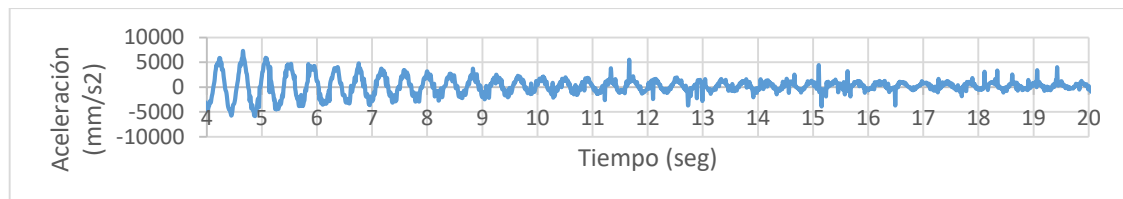


Figura 59. Ensayo de vibración libre 10: Dirección Y, ADXL335.

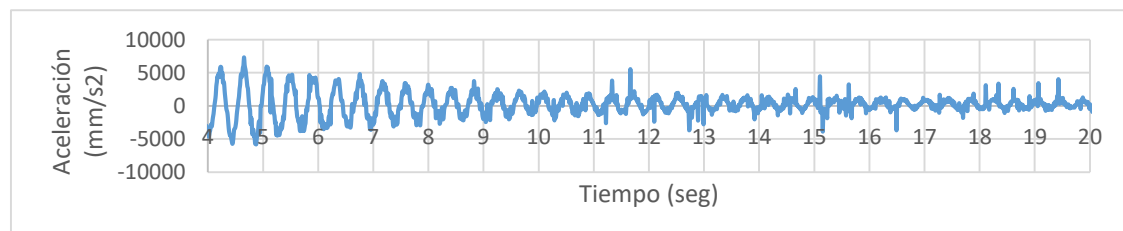


Figura 60. Ensayo de vibración libre 11: Dirección Y, ADXL335.



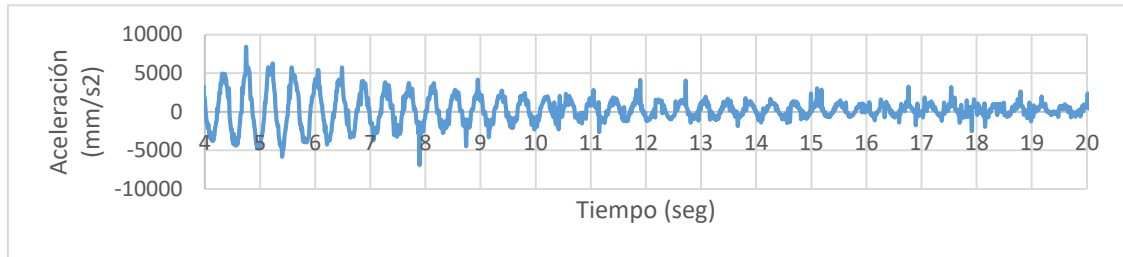


Figura 61. Ensayo de vibración libre 12: Dirección Y, ADXL335.

Usando la fórmula de decremento logarítmico planteada también para el ensayo de vibración libre de la Estructura 1, que se repite a continuación por comodidad, se halló el amortiguamiento crítico para los ensayos antes descritos.

$$U = \frac{\ln\left(\frac{C_I}{C_{II}}\right)}{\sqrt{4\pi^2 n^2 + \left(\ln\left(\frac{C_I}{C_{II}}\right)\right)^2}}$$

Donde:

- U = porcentaje de amortiguamiento crítico
- $C_I$  y  $C_{II}$  = picos de la señal
- N = número de ciclos entre picos

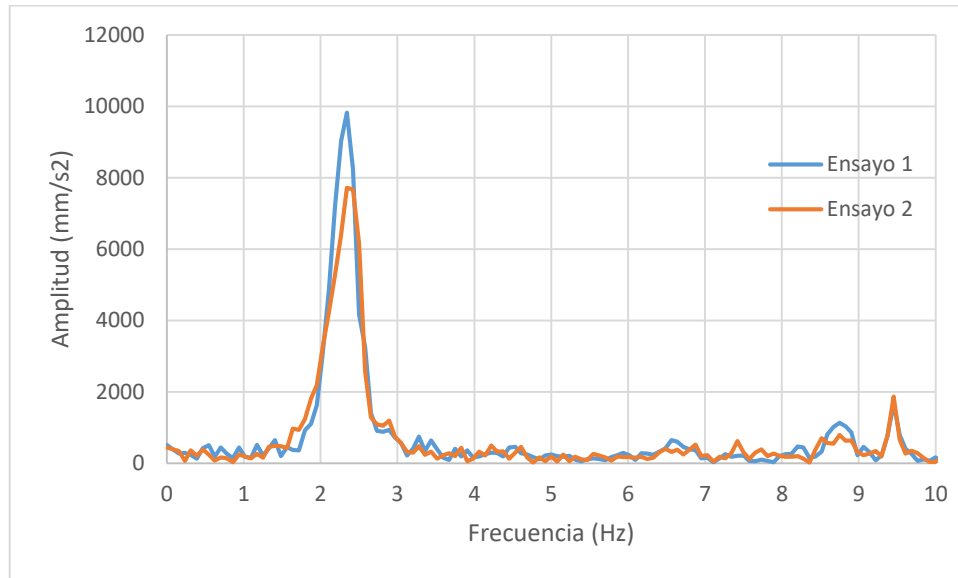
En la tabla 13 se pueden observar las coordenadas de los puntos seleccionados y el resultado del amortiguamiento para cada ensayo

Tabla 13. Amortiguamiento Estructura 2.

Ensayo	Punto 1		Punto 2		Numero de clicos entre puntos	Amortiguamiento
	Tiempo (s)	Aceleración (mm/s²)	Tiempo (s)	Aceleración (mm/s²)		
1	6,427	5.650	10,962	1.040	11	2,447
2	7,005	5.277	10,729	1.115	9	2,748
3	7,805	4.682	13,141	669	13	2,382
4	7,009	6.389	10,328	1.418	8	2,994
5	6,849	4.993	15,055	578	16	2,144
6	7,06	4.417	10,781	1.154	9	2,373
7	5,839	4.730	12,086	1.163	14	1,595
8	5,651	6.143	12,331	1.089	16	1,721
9	5,884	4.953	12,987	866	17	1,633
10	5,069	5.928	10,086	1.970	11	1,594
11	5,089	5.784	10,931	1.778	12	1,565
12	5,572	5.760	11,464	1.658	14	1,416

Adicionalmente utilizando los datos de este ensayo se hallaron las frecuencias naturales del sistema para ellos se utilizó la transformada rápida de Fourier o FFT por sus siglas en inglés (Fast Fourier Transform). Estas frecuencias también fueron obtenidas siguiendo el mismo procedimiento pero con barrido de señal aleatoria como se explicara más adelante.

Los resultados de esta experiencia son comparados en el gráfico 62, cada línea representa uno de los ensayos realizados.



*Figura 62. Espectro de frecuencia de la Estructura 2.*

En la tabla 14 se aprecian las coordenadas de los puntos de máxima amplitud. La coordenada X de estos puntos representa la frecuencia natural del primer modo de vibración de la estructura.

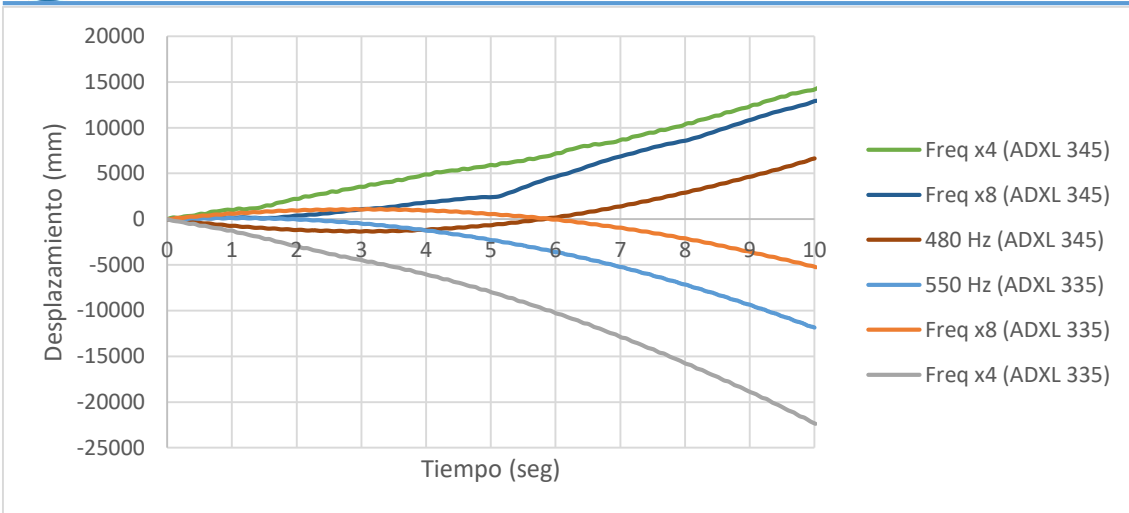
*Tabla 14. Frecuencias naturales y amplitudes máximas.*

Ensayo	Frecuencia (Hz)	Amplitud (mm/s²)
1	2,34	9824,16
2	2,34	7714,04

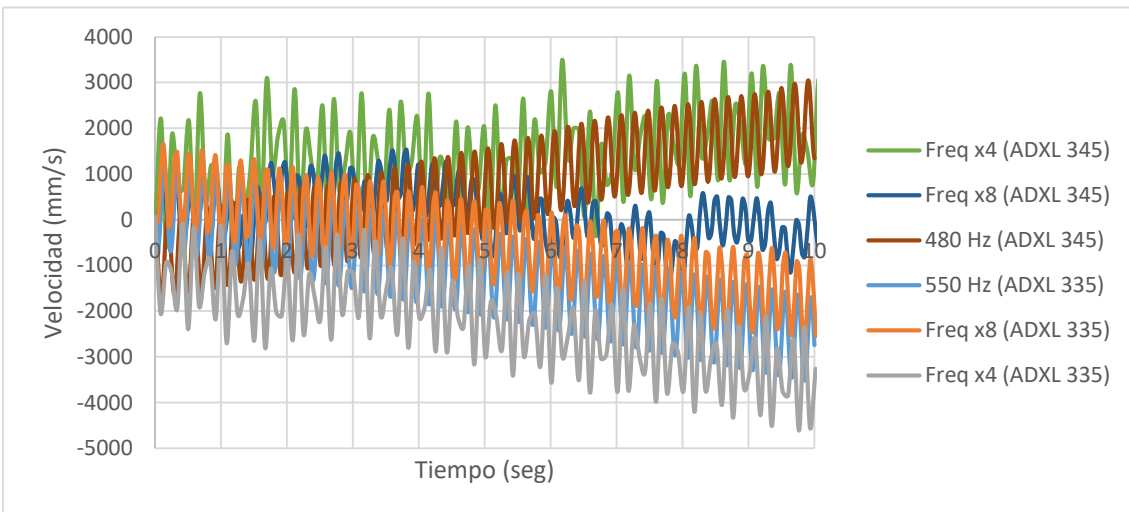
Al igual que en el ensayo de la Estructura 1 se puede observar que a pesar de que existe una diferencia máxima del 21,5% en las amplitudes las frecuencias obtenidas coinciden.

### 3.4.3. Ensayo de vibración forzada Estructura 1.

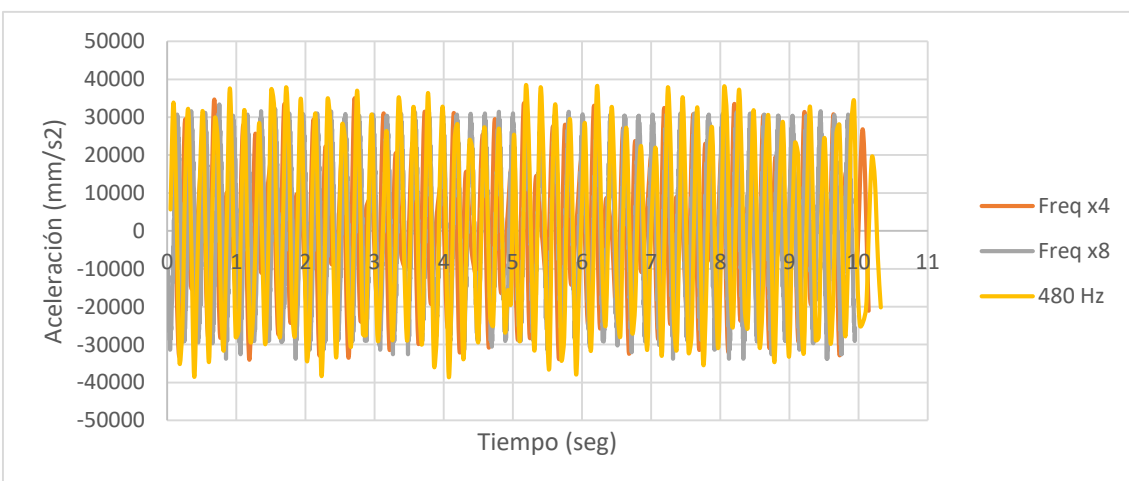
En este apartado se muestra la respuesta de la Estructura 1 cuando es sometida a una forzante armónica cercana a su frecuencia natural. Para ello se calculan los gráficos de Velocidad y desplazamiento a partir de los acelerogramas obtenidos. En la serie de gráficos a continuación presentados se pueden observar los espectros de respuesta de la Estructura 1 en el dominio del tiempo para 5,55Hz y las diferentes velocidades de muestreo utilizadas.



*Figura 63. Historia de desplazamientos de la Estructura 1.*



*Figura 64. Historia de velocidades de la Estructura 1.*



*Figura 65. Historia de aceleraciones de la Estructura 1. (ADXL 345)*

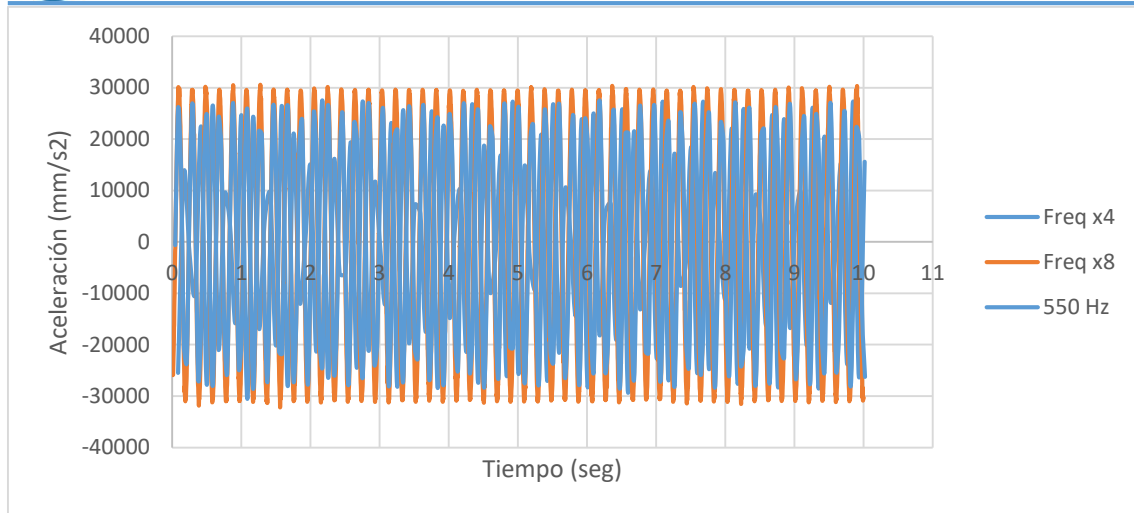


Figura 66. Historia de aceleraciones de la Estructura 1. (ADXL 335)

Las gráficas de desplazamiento y velocidad se agrupan para los dos acelerómetros para observar de manera más cómoda las diferencias de errores entre ambos acelerómetros, mientras que las gráficas de aceleraciones se presentan de manera separa para cada acelerómetro para poder comparar la diferencia de las señales en base a la velocidad de muestreo.

Como se puede notar en los espectros de velocidad y desplazamiento el error de la magnitud aumenta a lo largo del tiempo por lo que los datos de velocidad y posición no pueden ser usados para obtener respuestas precisas de estos parámetros, por lo que es recomendable hacer uso de sensores adicionales cuando se requiera este tipo de propiedades. Por ejemplo el uso de infrarrojos o sensores de ultra sonido. Cabe comentar que estos sensores entran dentro del gran abanico de sensores de bajo coste compatibles con las placas de Arduino. Crear configuraciones con diversos sensores funcionando de manera simultánea podría brindar exactitudes aceptables para una gran gama de problemas de la ingeniería civil.

En general las estimaciones de velocidad y posición basadas en las aceleraciones registradas por acelerómetros de bajo coste suele ser muy poco precisas y simplemente inviable para la mayoría de aplicaciones. Esto no es debido a que el acelerómetro sea deficiente o impreciso en sí mismo, si no el alto grado de precisión con el que hay que controlar su posición con respecto a la gravedad, el más mínimo error de posición puede generar errores en la aceleración que se traduce a errores mucho más grandes en la velocidad y el desplazamiento.

Dado que en la práctica nunca conocemos la orientación del sensor a la perfección, la adición del término de gravedad no logrará eliminar las fuerzas normales medidas, y esas fuerzas se confundirán con la aceleración física. Resulta que en los sensores de bajo costo, el error de orientación provocara errores de medición que pueden empequeñecer desalineación y la mala calibración del acelerómetro. Este error alcanza valores que suficientemente grades como para que no sean viables en la mayoría de las aplicaciones.

A pesar de no encontrar información explicativa sobre estos errores para estos acelerómetros, se pudo hallar información sobre un fabricante de acelerómetros de gama media (CH Robotics). En la tabla 15 se resumen los errores de aceleración, velocidad y posición que pueden esperarse dados los diferentes errores en la estimación de orientación para sus sensores.

Tabla 15. Resumen de errores de aceleración, velocidad y posición esperados en función del error de orientación.

Ángulo de error (°)	error de aceleración (mm/s <sup>2</sup> )	error de velocidad a 10 s (mm/s)	error de posición a 10 s (mm)	error de posición a 1min (mm)
0,1	17	170	1700	61200
0,5	86	860	8600	309600
1	170	1700	17000	612000
1,5	256	2560	25600	921600
2	342	3420	34200	1231600
3	513	5130	51300	1846800
5	854	8540	85400	3074400

Si se observan las magnitudes de desplazamiento a los 10 segundos del registro, para ambos acelerómetros, los valores de desplazamiento están entre un mínimo de 5260 mm y un máximo de 22381 mm. Para las velocidades el desfase con respecto al cero alcanza valores de 1720 y 3161 mm/s. comparando estos valores con los de la tabla 16 se puede concluir que el acelerómetro tenía un error de desviación de entre 0,5 y 1 grados.

Resulta interesante observar que el error del acelerómetro parece reducirse con la velocidad de muestreo. Tendencia que se observa en ambos acelerómetros, existiendo una reducción de prácticamente un 70% entre la mínima y la máxima velocidad de muestreo, para el sensor digital y 55% para el sensor analógico.

Cabe mencionar también que a pesar de presentar graficas menos consistentes el acelerómetro ADXL 345 posee un error acumulativo menor que el obtenido con el ADXL 335, que después de 10 segundos posee un error en el desplazamiento 38% mayor que el del ADXL 345.

#### 3.4.4. Ensayo de vibración forzada Estructura 2.

Para este ensayo la estructura se sometió a dos aceleraciones en la base. La primera corresponde a la señal del sismo del centro, y la segunda es una señal de ruido blanco. En este apartado se muestran los acelerogramas obtenidos de ambas señales.

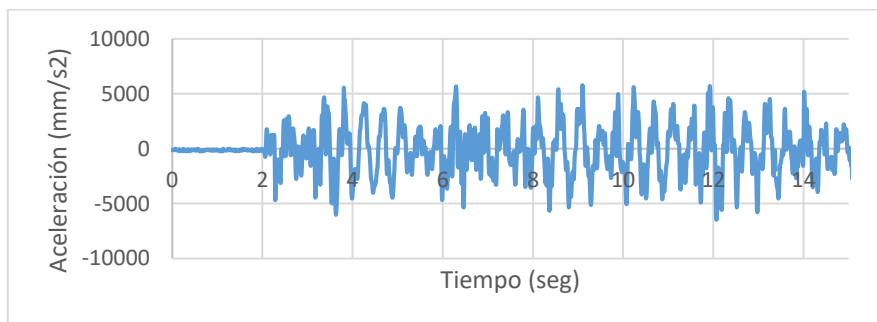


Figura 67. Respuesta de la Estructura 2 frente a la señal de Ruido blanco. ADXL 345.

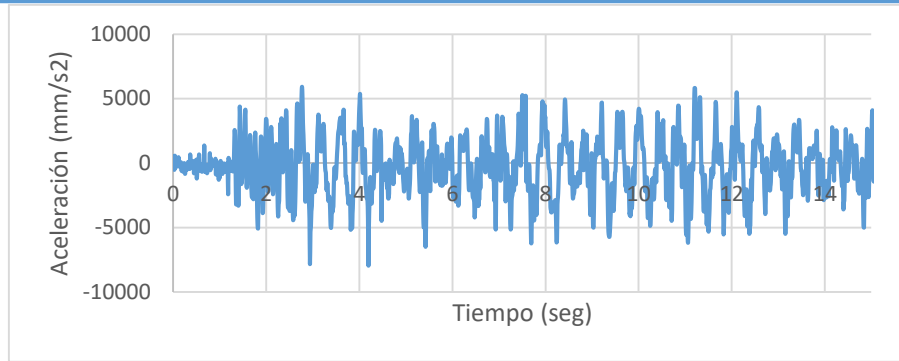


Figura 68. Respuesta de la Estructura 2 frente a la señal de Ruido blanco. ADXL 335.

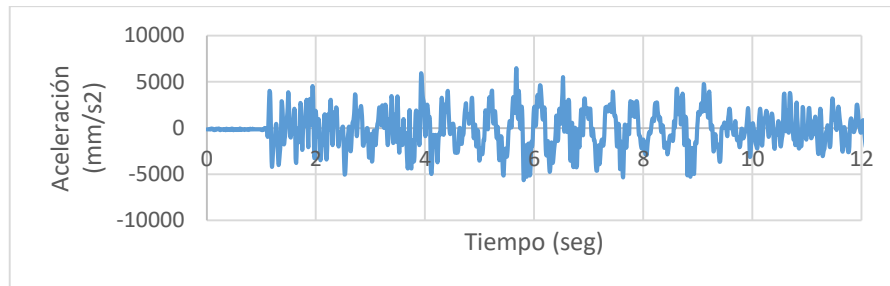


Figura 69. Respuesta de la Estructura 2 frente a la señal del sismo del centro. ADXL 345.

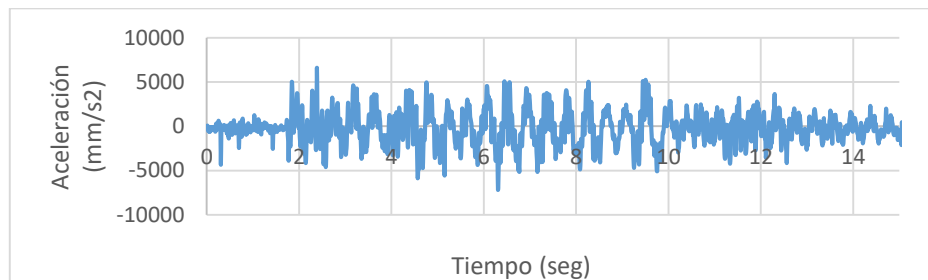


Figura 70. Respuesta de la Estructura 2 frente a la señal del sismo del centro. ADXL 335.

Los intervalos de tiempo entre los 0 segundos y los 1,5 o 2 segundos la estructura se encontraba en reposo, partiendo de esta afirmación se puede observar que las dos graficas correspondientes a las mediciones obtenidas con el ADXL 335 presentan una distorsión mayor que aquellas graficas obtenidas con el ADXL 345. Además las ondas de ambas graficas muestran curvas con picos y apariencia más angulosa que aquellas graficas obtenidas en la Estructura 1. A pesar de esto, como se discute en el capítulo 5, es posible extraer información consistente de estas señales.

### 3.4.5. Ensayo de barrido de frecuencias Estructura 1.

Para este ensayo se sometió la Estructura 1 a un barrido de frecuencias desde 0,5Hz hasta 15Hz y se midió la respuesta máxima de la estructura para cada frecuencia. A su vez cada frecuencia fue tomada con 4 velocidades de muestreo diferentes, para determinar cuál es la mínima frecuencia de muestreo necesaria para estimar el comportamiento de una estructura.

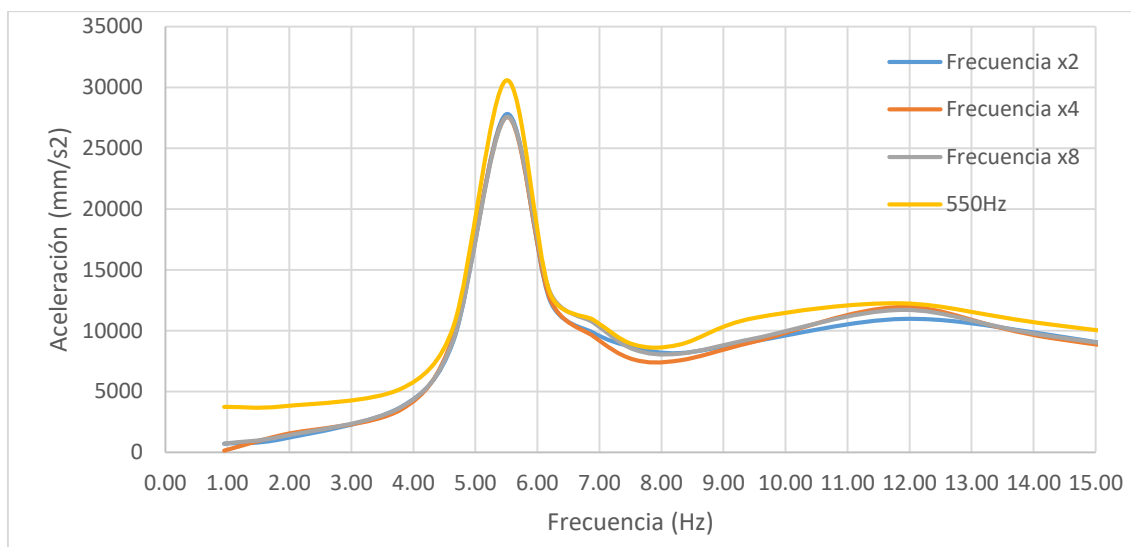
Las siguientes condiciones de contorno fueron aplicadas:

- Pilares empotrados en la base
- Estructura sometida a una carga armónica de frecuencia conocida.

En la tabla 16 se puede observar las amplitudes máximas para cada frecuencia ensayada y cada velocidad de muestreo. Mientras que en el gráfico 71 se observa el espectro de frecuencia de la Estructura 1.

*Tabla 16. Resultados del barrido de frecuencia de la Estructura 1 usando el ADXL 335.*

Velocidad de muestreo	frecuencia x2	frecuencia x4	frecuencia x8	550Hz
Frecuencia (Hz)	Aceleración Max (mm/s <sup>2</sup> )	Aceleración Max (mm/s <sup>2</sup> )	Aceleración Max (mm/s <sup>2</sup> )	Aceleración Max (mm/s <sup>2</sup> )
0,95	698	139	722	3721
1,90	1106	1442	1322	3769
3,80	3721	3505	3697	5208
4,65	9215	9575	9335	10391
5,50	27808	27544	27544	30589
6,20	12526	12670	13222	13126
6,90	9839	9551	10678	10894
7,55	8639	7632	8471	8855
8,30	8159	7560	8111	8855
9,50	9143	9095	9359	11038
11,90	10966	11950	11710	12238
14,30	9623	9383	9527	10487
20,30	4465	5472	5592	6792



*Figura 71. Resultado del barrido de frecuencias en la Estructura 1 usando el acelerómetro ADXL 335*

Estos resultados son repetidos a continuación pero usando el acelerómetro ADXL 345.



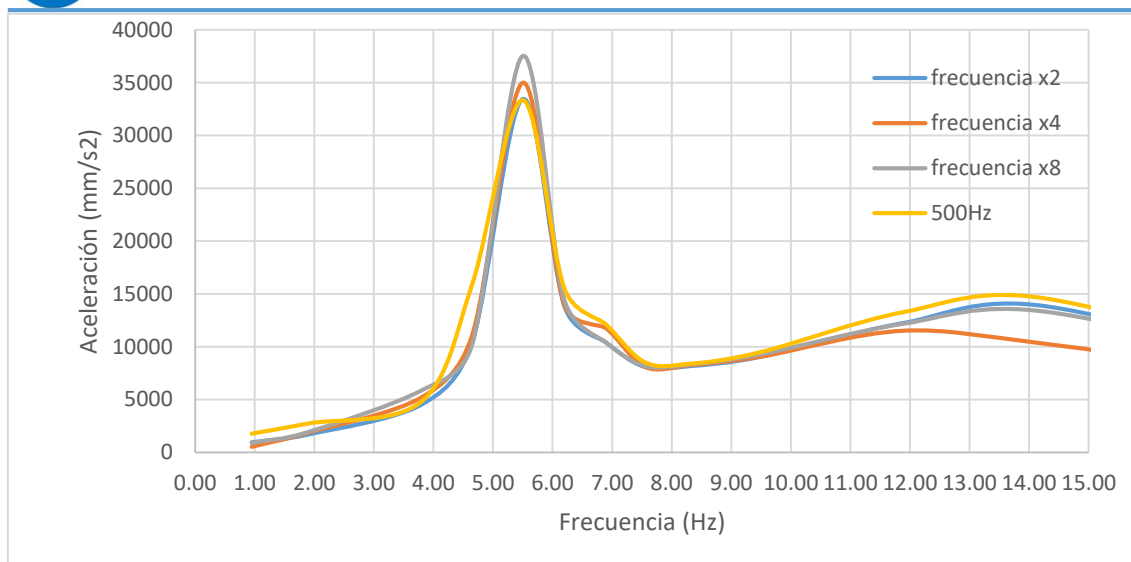


Figura 72. Resultado del barrido de frecuencias en la Estructura 1 usando el acelerómetro ADXL 345

Tabla 17. Tabla de resultados del barrido de frecuencia de la Estructura 1 usando el ADXL 345

Velocidad de muestreo	frecuencia x2	frecuencia x4	frecuencia x8	500Hz
Frecuencia (Hz)	Aceleración Max (mm/s²)	Aceleración Max (mm/s²)	Aceleración Max (mm/s²)	Aceleración Max (mm/s²)
0,95	966	520	892	1784
1,90	1709	1858	1932	2750
3,80	4533	5202	5871	4831
4,65	10405	11073	10182	15904
5,50	33443	35004	37531	33369
6,20	13823	13972	14418	15533
6,90	10405	11742	10405	12114
7,55	8101	8101	8175	8547
8,30	8175	8249	8324	8398
9,50	9067	9067	9290	9513
11,90	12263	11519	12188	13303
14,30	13823	10256	13303	14566
20,30	5425	5648	5945	5797

Ambas graficas presentan un pico en 5,5Hz. Mientras que la diferencia de amplitud es cercana al 1% con el ADXL 335 y llega hasta un 12,5% en el ADXL 345. Estos resultados serán comparados con los resultados de vibración libre en el capítulo 5.

## 4. MODELO NUMÉRICO

### 4.1. Introducción

Con el objetivo de comparar con los resultados experimentales y validar el modelo numérico. Y posteriormente validar este modelo. Para ello se planteó la realización de dos modelos de elementos finitos utilizando el programa Abaqus. Uno de la Estructura 1 y un segundo modelo más complejo de la Estructura 2.

El Método de Elementos Finitos, es un método numérico general para aproximar soluciones de ecuaciones diferenciales complejas utilizado ampliamente en ingeniería. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina nodos, estos nodos forman una red denominada malla, esta malla está formada elementos que son los llamados “elementos finitos”

Desde el punto de vista de la programación algorítmica los pasos necesarios para llevar a cabo un cálculo utilizando este método son los siguientes:

- Preproceso: en esta primera etapa se define la geométrica, condiciones de contorno cargas materiales etc. y se genera la malla de elementos finitos.
- Calculo: si el paso anterior resulta en un problema lineal y no dependiente el tiempo se genera un conjunto de N ecuaciones con N incógnitas que puede ser resuelto con cualquier algoritmo que permita la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. En el caso de un problema no lineal o dependiente del tiempo se resuelve una sucesión finita de ecuaciones cuya entrada depende del paso anterior.
- Postproceso: en este paso se calculan las magnitudes derivadas de los valores obtenidos en los nodos en ocasiones se aplican interpolaciones e incluso determinación de errores o curvas de suavizado.

En este capítulo se explica de manera detallada las geometrías, materiales, y otros aspectos considerados en la modelización de las estructuras. En líneas generales se puede decir que se llevaron a cabo tres tipos de análisis.

- Análisis de frecuencia (Frequency Analysis), para determinar las frecuencias de la estructura y los modos de vibración de las mismas
- Análisis modal dinámico (Modal Dynamic Analysis), en el que se determinaron las respuestas de la estructura en el dominio del tiempo.
- Análisis de estado estable (Steady State Analysis), en el que se halló la respuesta de la estructura en el dominio de la frecuencia.

### 4.2. Caracterización del modelo Estructura 1- Preproceso

Abaqus no posee una plantilla predefinida de unidades, por lo que si no se tiene cuidado al introducir datos puede generar resultados erróneos o indeseados, por lo que es importante adoptar un sistema de unidades consistentes para garantizar que los resultados entregados por el programa son fiables.

Para este estudio se escogió el Sistema Internacional de unidades en milímetros. En la tabla 18 se observa las unidades consistentes a este sistema.

Tabla 18. Sistema de unidades consistentes

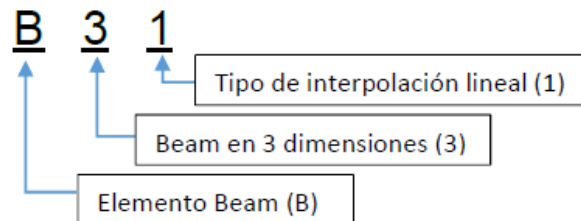
Cantidad	Sistema Internacional	Sistema Internacional (mm)	Unidades EEUU (ft)	Unidades EEUU (in)
Longitud	m	mm	ft	in
Fuerza	N	N	lbf	lbf
Masa	kg	ton	slug	lbf s <sup>2</sup> /in
Tiempo	s	s	slug	s
Esfuerzo	N/m <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	lbf/ft <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup>
Energía	J	mJ	ft lbf	in lbf
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	ton/mm <sup>3</sup>	slug/ft <sup>3</sup>	lbf s <sup>2</sup> /in <sup>4</sup>

#### 4.2.1. Elementos

Considerando las características geométricas de los elementos que conforman la estructura se planteó la utilización de elementos tipo “Wire-Beam” para los pilares de acero y elementos tipo “Shell” para los forjados de metacrilato.

##### 4.2.1.1. Elemento tipo Viga:

Como se mencionó anteriormente los pilares se simularon en Abaqus usando elementos del tipo “Beam”. La nomenclatura utilizada para estos elementos dentro del programa es la siguiente



Donde:

- B: se refiere al tipo de elemento estructural, en este caso “Beam”
- El segundo número se refiere las posibles dimensiones de las que dependerán los grados de libertad. Para este caso el elemento está en 3 dimensiones y por lo tanto tendrá 6 grados de libertad.
- El último número indica el tipo de interpolación usada para los nodos del elemento. En este caso el 1 indica una interpolación lineal.

Otro parámetro importante a la hora de crear el modelo en el software es la definición de la orientación de los pilares. Aunque en el presente estudio no es de interés particular obtener esfuerzos sin la definición de estas direcciones el programa no puede continuar con el proceso. Por esta razón se utiliza como convenio de orientaciones el definido por defecto.

Las propiedades y medidas físicas utilizadas para la simulación de los pilares se pueden consultar en la tabla 19.

*Tabla 19. Propiedades de los pilares.*

**Pilares - Acero**

**Geometría:**

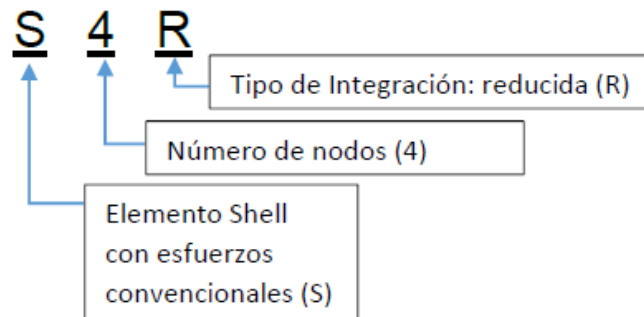
Altura total:	515 mm
Altura 1:	260 mm
Altura 2	255 mm
Diámetro:	4,5 mm

**Material:**

Módulo de elasticidad:	210.000 N/mm <sup>2</sup>
Densidad:	7,85E-09 Ton/mm <sup>3</sup>
Módulo de Poisson:	0,3

#### 4.2.1.2. Elementos tipo Placa

Como se comentó previamente los forjados se simularon en Abaqus usando elementos del tipo "Shell". La nomenclatura utilizada para estos elementos dentro del programa es la siguiente.



Donde:

- S: se refiere al tipo de elemento estructural, en este caso "Shell"
- El número indica el número de nodos del elemento.
- La segunda letra indica el tipo de integración usada para resolver el elemento.

Las propiedades y medidas físicas utilizadas para la simulación de los pilares se pueden consultar en la tabla 20.

*Tabla 20. Propiedades de los forjados.*

### **Forjados - Metacrilato**

#### **Geometría:**

Ancho:	120 mm
Largo:	120 mm
Espesor:	10 mm

#### **Material:**

Módulo de elasticidad:	3.300 N/mm <sup>2</sup>
Densidad:	1,19E-09 Ton/mm <sup>3</sup>
Módulo de Poisson:	0,45

### 4.2.2. Condiciones de contorno

La base del edificio se simuló totalmente empotrada. Al igual que las uniones entre pilares y forjados. A pesar de que esto no es totalmente cierto se tomaron las previsiones necesarias para lograr uniones lo más rígidas posibles como se explicó en el apartado de ensamblaje de la estructura.

## 4.3. Análisis dinámico – Estructura 1

En este apartado se explican los tres tipos de análisis dinámicos realizados a la Estructura 1. El primero de ellos es el análisis de frecuencias naturales correspondientes a los modos de vibración de la estructura. Luego se realizó un análisis “steady-state” para conocer el comportamiento de la estructura en el dominio del tiempo. Y por último un análisis dinámico modal para la obtención de la respuesta de la estructura en el dominio del tiempo.

Los resultados del modelo numérico son comparados con los experimentales en el próximo capítulo.

### 4.3.1. Análisis de frecuencias modales

Este es el primer análisis realizado en la estructura ya que los análisis subsecuentes necesitan los datos de las frecuencias naturales para arrojar resultados.

Para este análisis en el módulo “step” del Abaqus se selecciona la opción “Linear Perturbation” y luego la opción “frecuencias”. Para este análisis no es necesario la aplicación de cargas ni estáticas ni dinámicas, ni la fracción de amortiguamiento crítico.

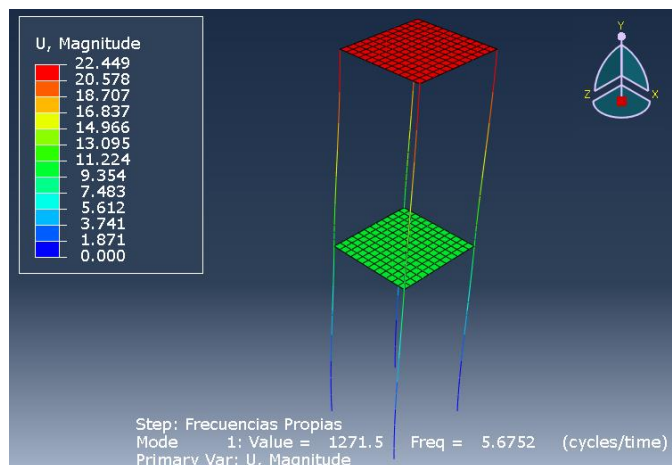
Las simplificaciones impuestas previamente relacionadas con la concentración de la masa y la existencia de un diafragma rígido en los forjados hacen que la estructura pueda entenderse como un conjunto de cuerpos rígidos en el plano horizontal, vinculados entre sí por elementos flexibles, obteniéndose de este modo el denominado pórtico de cortante (Chopra, 2014).

Debido a que la estructura experimental solo se ensayó hasta los 15Hz se configuró Abaqus para obtener solamente los modos de vibración que estén en este rango de frecuencias.

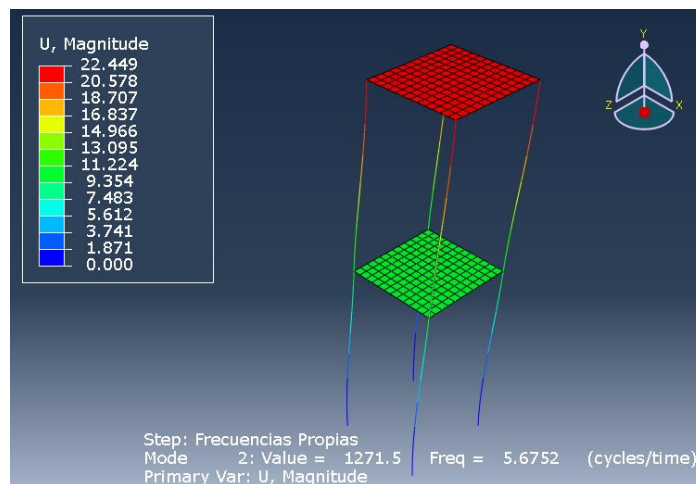
#### 4.3.2. Obtención de resultados - Postproceso

En el rango de frecuencias entre 0 y 15Hz se observan tres modos de vibración, dos de los cuales corresponden a modos de vibración traslacionales y se dan en la misma frecuencia debido a la simetría de la estructura. El tercer modo corresponde a un modo de vibración torsional.

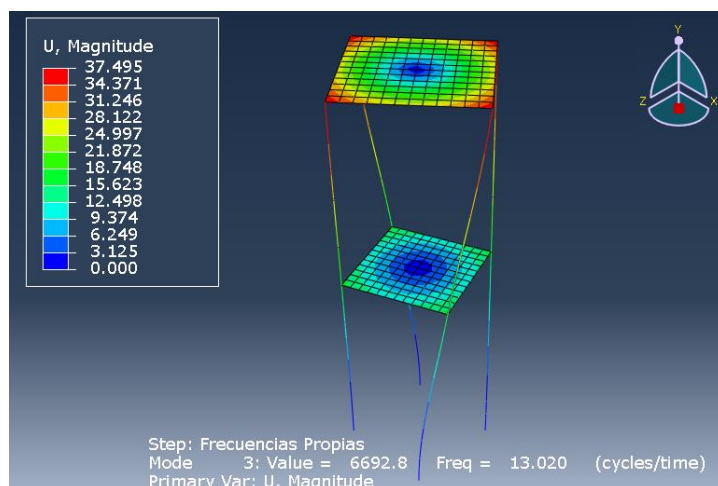
En la serie de figuras a continuación se observa la deformada de cada modo de vibración, y en la tabla 21 se resume las frecuencias de cada modo.



*Figura 73. Deformada del primer modo de vibración*



*Figura 74. Deformada del segundo modo de vibración*



*Figura 75. Deformada del tercer modo de vibración.*

*Tabla 21. Resumen resultados del análisis de frecuencias.*

#### **Estructura 1 - Frecuencias naturales**

##### **1er modo:**

Frecuencia:	5,675 Hz
Amplitud:	22,49 mm

##### **2do modo:**

Frecuencia:	5,675 Hz
Amplitud:	22,49 mm

##### **3er modo:**

Frecuencia:	13,02 Hz
Amplitud:	37,495 mm

Cabe comentar que el 3er modo de vibración no se logró detectar en el modelo experimental, debido a que la aceleración está aplicada lo más alineado posible con la estructura precisamente para evitar esfuerzos de torsión y porque las medidas de aceleración fueron tomadas en una sola dirección.

Los resultados de este apartado son comparados con los experimentales en el capítulo de análisis comparativo de resultados.

#### **4.3.3. Análisis modal dinámico**

La forma teórica del análisis modal consiste en plantear la ecuación del movimiento, suponer una forma de la respuesta e imponer que esta cumpla la ecuación que gobierna el movimiento del sistema, lo que supone resolver un problema de autovalores y autovectores, como se indica en Ewins (2000). Dicho problema puede ser un proceso largo en el caso de tratar un sistema de varios grados de libertad. Para obtener la ecuación de movimiento Abaqus calcula las matrices de masa y rigidez y los factores de amortiguamiento. Y presenta los resultados como una función en el dominio del tiempo que depende de una carga que también varía en el tiempo.

Sin embargo, como se explicó en el capítulo anterior los resultados arrojados por acelerómetros utilizados en este estudio no son suficientemente precisos para



determinar el desplazamiento y la velocidad de la estructura, por lo que de este análisis solo se extraerá la respuesta de aceleración vs tiempo.

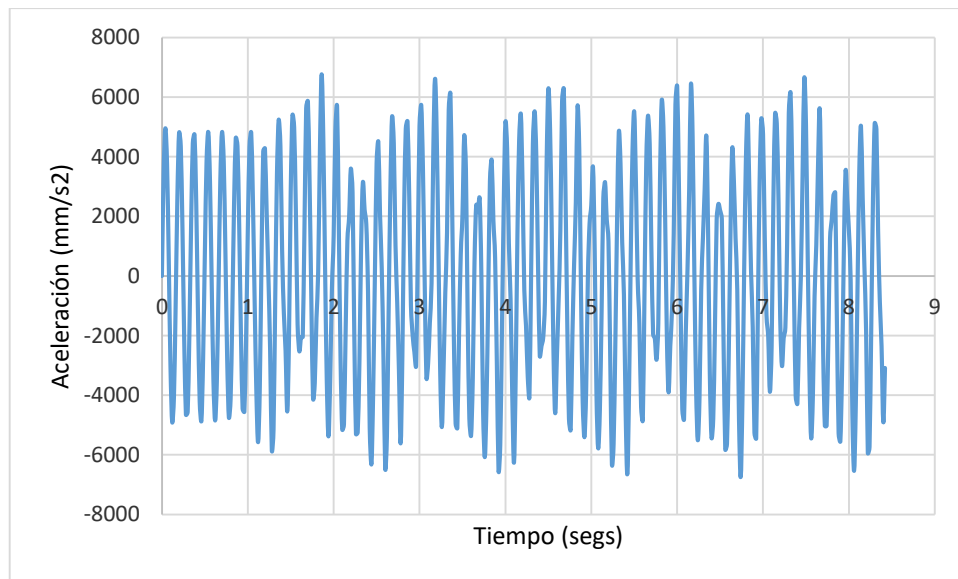
#### 4.3.3.1. Procedimiento

Al igual que el análisis de frecuencias para ejecutar este análisis también se hizo uso de la opción “linear perturbation” en el módulo de “step”, y luego la casilla de “Modal dynamics”.

Los datos que se introdujeron son el tiempo total del análisis y el intervalo de incremento del mismo. En este caso el tiempo total es de 10 segundos (acorde a los tiempos medidos experimentalmente) y el valor del incremento es 0,01 segundos para reducir la carga computacional del modelo. El último dato introducido es la fracción de amortiguamiento crítico calculada en el ensayo de vibración libre de la Estructura 1 cuyo valor es igual a 3,8%.

Luego de definir los parámetros del análisis se procedió a definir la carga dinámica que se utilizó en el software para llevar acabo el análisis. Esta carga es una aceleración aplicada a la base y que corresponde a la carga que aplica el actuador sobre la estructura experimental para obtener la mayor respuesta, por lo que es de esperar que esta carga sea también muy cercana a la frecuencia natural del modelo numérico.

En la figura 76 corresponde a la gráfica de aceleración-tiempo de la carga aplicada en la base del modelo.



*Figura 76. Gráfico de aceleración aplicada en la base del modelo.*

Para importar esta función a Abaqus, se utilizó en el módulo de “Load” la opción de crear condición de contorno y luego de seleccionar aceleración en la base se definió una amplitud con los datos obtenidos por el sensor.

#### 4.3.3.2. Obtención de resultados – Postproceso

Los resultados se obtienen para el primer modo de vibración utilizando la carga dinámica mostrada en la figura 77 y se extrae la respuesta de la aceleración en el dominio del tiempo. La comparación de esta aceleración con la medida experimentalmente se muestra en el próximo capítulo.

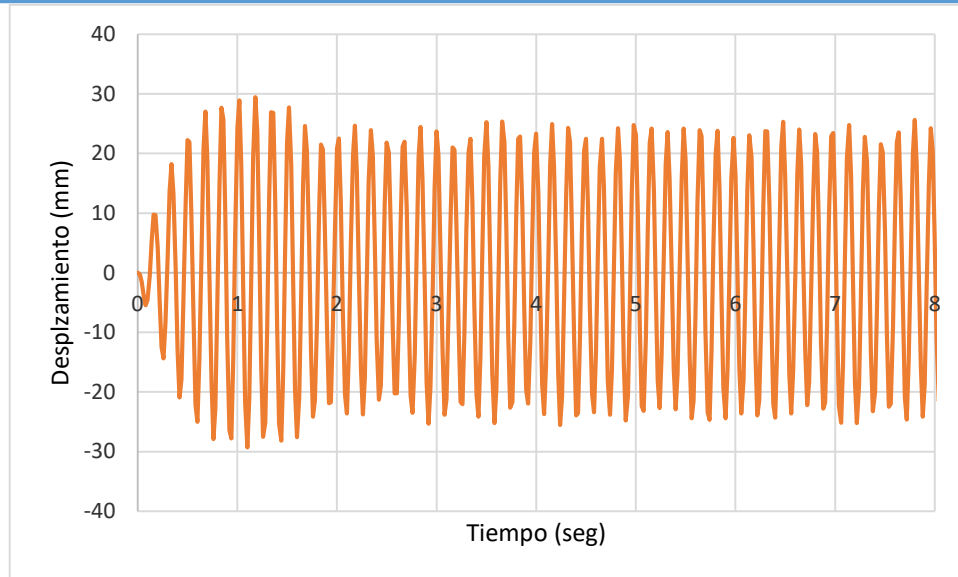


Figura 77. Respuesta de desplazamiento en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 1.

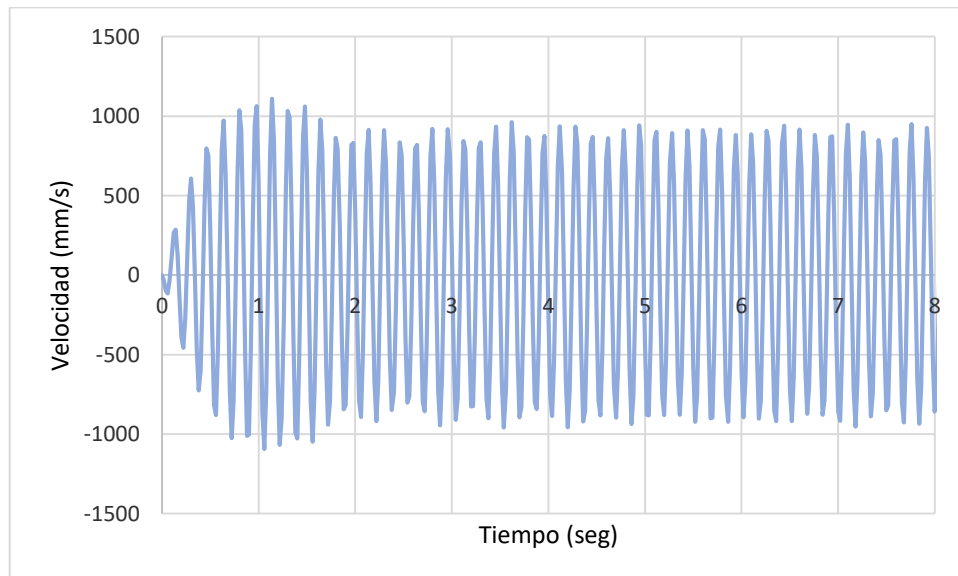


Figura 78. Respuesta de velocidad en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 1.

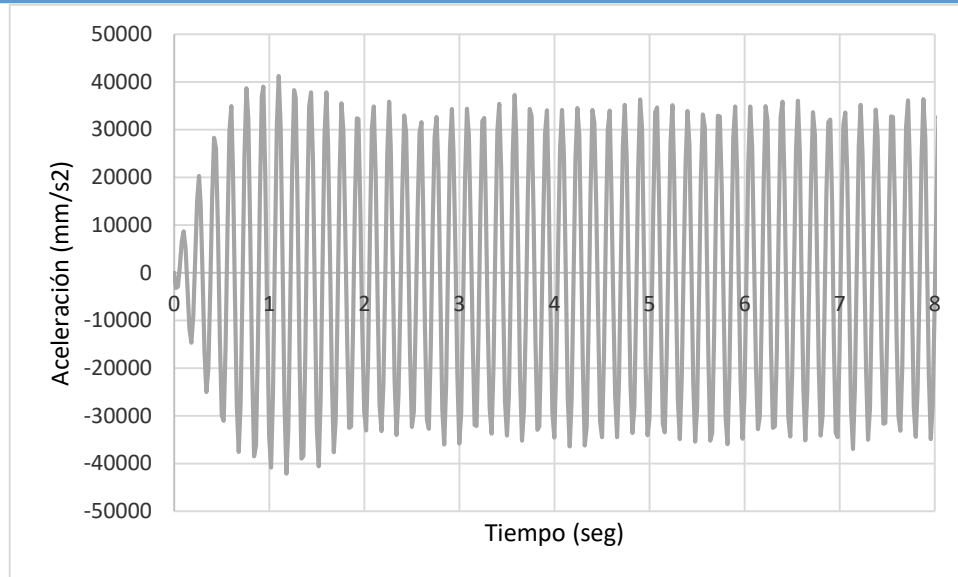


Figura 79. Respuesta de aceleración en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 1.

Tabla 22. Valores máximos para el primer modo de vibración de la Estructura 1.

#### Estructura 1 - Análisis modal

##### 1er modo:


Desplazamiento máximo:	29,4 mm
Velocidad máxima:	1110,0 mm/s
Aceleración máxima:	41240,4 mm/s²

#### 4.3.4. Análisis del régimen estacionario

El “steady-state analysis” permite obtener la amplitud y la fase del estado estacionario de un sistema debido a una excitación armónica a una frecuencia determinada. Generalmente este tipo de análisis se lleva a cabo como un barrido de frecuencias al aplicar una carga con una gama determinada de frecuencias y por registrar la respuesta.

Para este estudio se ejecutó el módulo de “mode-based steady-state analysis” para lo cual es necesario realizar primero la extracción de las frecuencias propias.

Para realizar este análisis el software necesita dos parámetros importantes, el rango de frecuencias en el que se quiere obtener las frecuencias, en este caso 15hz como se puede ver en la figura 80 y la fracción de amortiguamiento crítico calculada en el ensayo de vibración libre de la Estructura 1.


 Edit Step ×

Name: SteadyState

Type: Steady-state dynamics, Modal

Basic **Damping**

Description:

NIgeom: Off 

Scale: ☒ Logarithmic ☐ Linear

☒ Use eigenfrequencies to subdivide each frequency range

Data

	Lower Frequency	Upper Frequency	Number of Points	Bias
1	0	15	20	3

Basic **Damping**

Specify damping over ranges of: ☒ Modes ☐ Frequencies

Direct modal ☒ Use direct damping data

Composite modal

Rayleigh

Structural

	Start Mode	End Mode	Critical Damping Fraction
1	1	4	0.038

Figura 80. Parámetros para el “Steady-state analysis”

Posteriormente se procedió a definir la carga dinámica que se configuró en el software para llevar a cabo el análisis. Esta carga corresponde a los datos de aceleración obtenidos por el sensor ADXL 345 durante un barrido de frecuencias desde 1Hz hasta 15Hz.

La figura 81 corresponde a la gráfica de aceleración-tiempo de la carga aplicada en la base del modelo para este análisis.

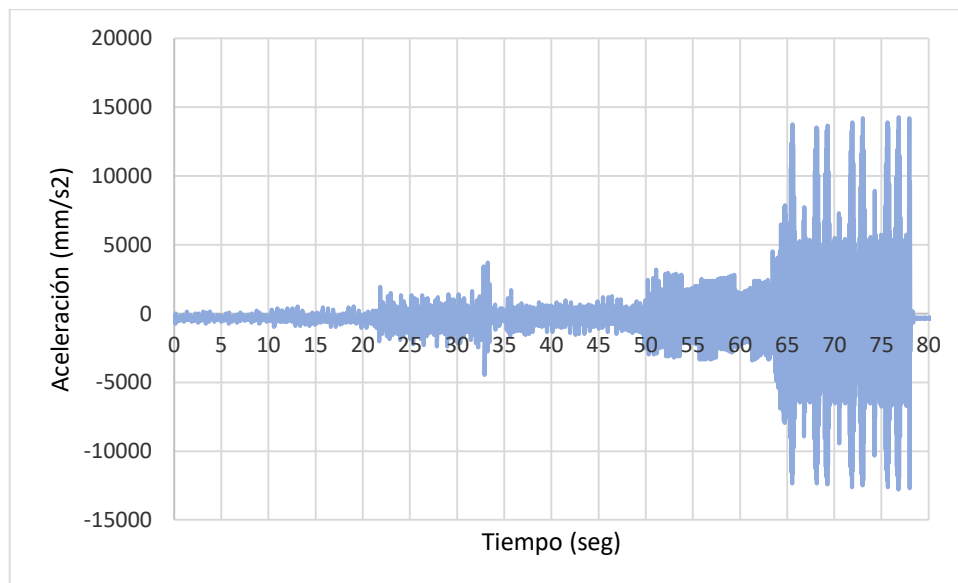


Figura 81. Función de aceleración definida como excitación de entrada para el modelo numérico de la Estructura 1.

Para importar esta función a Abaqus desde Excel se usó el mismo procedimiento que para la definición de la carga dinámica en el análisis modal del presente capítulo.

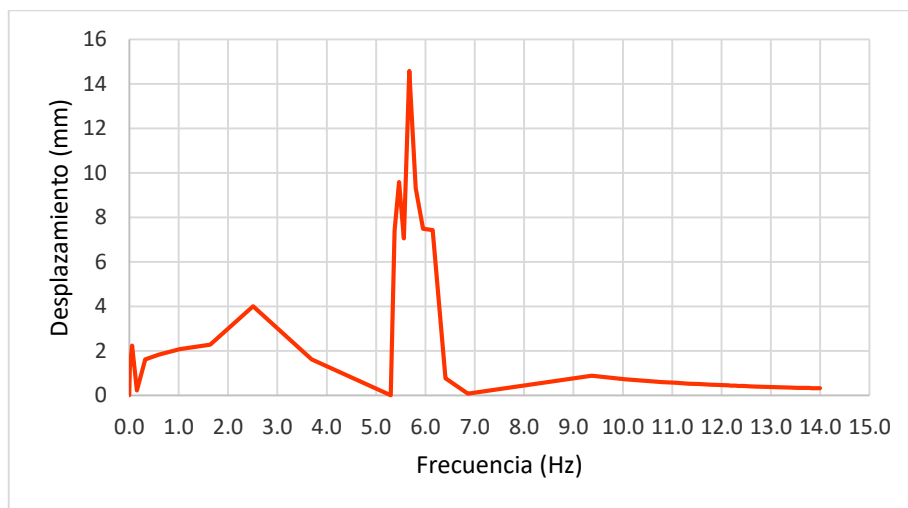
Se puede observar claramente donde existen cambios de amplitud que corresponden al incremento de frecuencias durante la toma de datos. En la tabla que se muestra a continuación se muestra las frecuencias y el tiempo ensayado.

*Tabla 23. Datos del barrido de frecuencias de la Estructura 1.*

<b>Estructura 1 - Steady State analysis</b>	
<b>Barrido de frecuencias</b>	
Tiempo (seg)	Frecuencia (Hz)
0 a 10	0,5
11 a 20	1
21 a 30	2
31 a 40	3
41 a 50	5
51 a 60	8
61 a 70	10
71 a 80	15

#### **4.3.4.1. Obtención de resultados – Postproceso**

En la serie de graficas a continuación se muestra el espectro de magnitud de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración de la estructura en el dominio de la frecuencia.



*Figura 82. Espectro de respuesta de desplazamiento en el dominio de la frecuencia de la Estructura 1.*

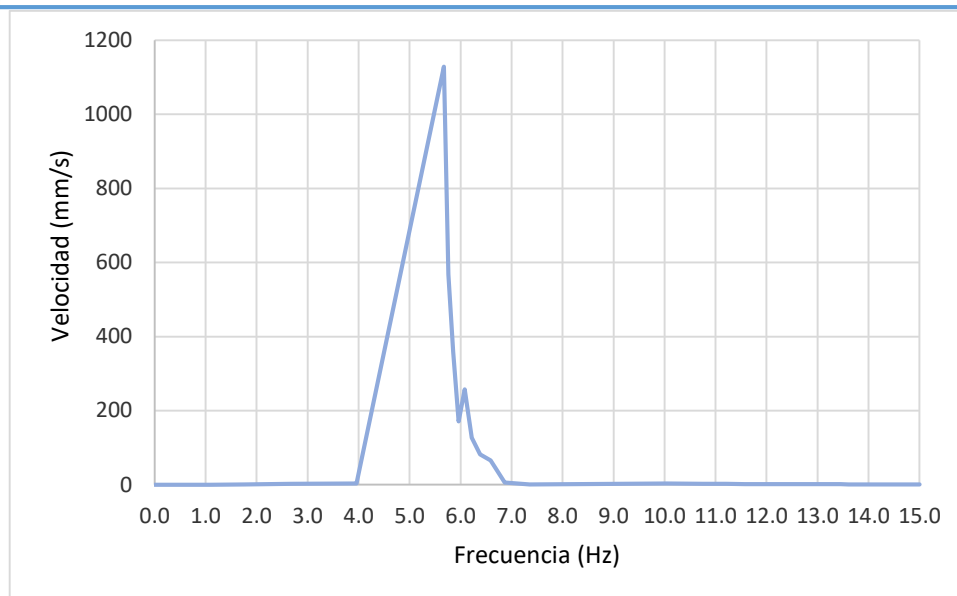


Figura 83. Espectro de respuesta de velocidad en el dominio de la frecuencia de la Estructura 1.

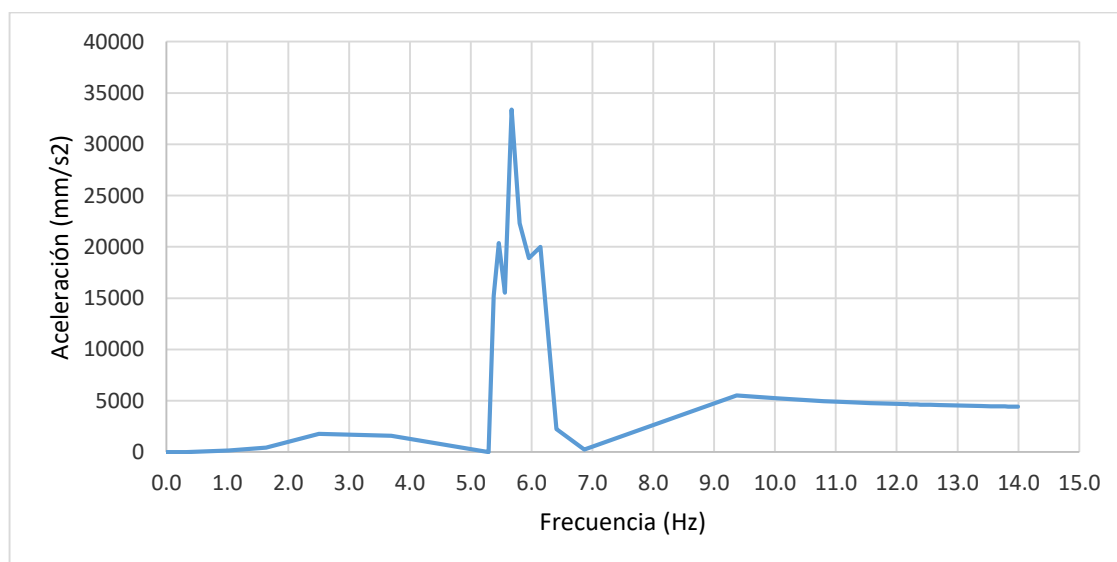


Figura 84. Espectro de respuesta de aceleración en el dominio de la frecuencia de la Estructura 1.

En la tabla 24 se resumen los valores de amplitud máxima y frecuencia de cada una de las gráficas anteriores.

Tabla 24. Resumen Steady-state análisis

**Estructura 1 - Análisis estado estacionario**

<b>1er modo:</b>	<b>Freq (Hz)</b>	<b>Magnitud</b>
Desplazamiento máximo:	5,675	29,16 mm
Velocidad máxima:	5,675	1128,76 mm/s
Aceleración máxima:	5,675	42577,15 mm/s²

Como era de prever los resultados arrojados por el análisis modal y los resultados obtenidos por el Steady-state analysis coinciden en la frecuencia correspondiente al

primer modo, e incluso las magnitudes máximas para este modo de vibración presentan variaciones de 0,82% para el desplazamiento, de 1,7% para la velocidad y 3,25% para la aceleración máxima.

La discusión de estos resultados y su comparativa con los resultados experimentales está planteada en el próximo capítulo.

## 4.4. Caracterización del modelo Estructura 2- Preproceso

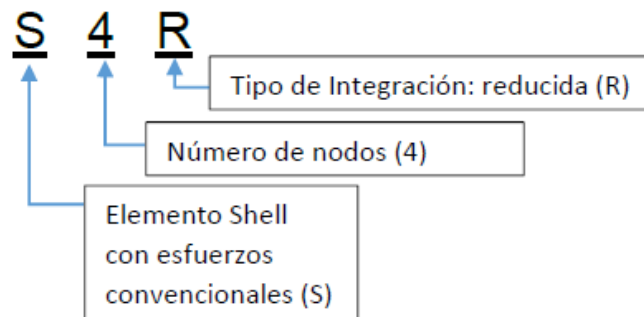
### 4.4.1. Elementos

Considerando las características geométricas de los elementos que conforman la estructura se planteó la utilización de elementos tipo “Shell” tanto para los pilares como para las vigas.

Usar elementos tipo placa para simular los pilares de sección L permite ubicarlos con mayor facilidad escogiendo la posición exacta y evitando tener que desplazar los elementos en base a su centro de gravedad después de ensamblada la estructura. La orientación de los mismos también resulta más sencilla si se usan elementos tipo placa.

#### 4.4.1.1. Elementos tipo Placa

Como se comentó previamente los elementos de la Estructura 2 fueron simulados en Abaqus usando elementos del tipo “Shell”. La nomenclatura utilizada para estos elementos dentro del programa es la siguiente.



Donde:

- S: se refiere al tipo de elemento estructural, en este caso “Shell”
- El número indica el número de nodos del elemento.
- La segunda letra indica el tipo de integración usada para resolver el elemento.

Las propiedades y medidas físicas utilizadas para la simulación de los pilares se pueden consultar en la tabla 25.



Tabla 25. Propiedades elementos de la Estructura 2

**Pilares - Acero**

**Geometría:**

Altura total:	1700 mm
Altura Libre:	400 mm
Sección:	20x20x2 mm

**Vigas - Acero**

**Geometría:**

Ancho:	20 mm
Espesor:	10 mm
Largo1:	721,5 mm
Largo2:	716,5 mm
Largo3:	770 mm

**Material:**

Módulo de elasticidad:	210.000 N/mm <sup>2</sup>
Densidad:	7,85E-09 Ton/mm <sup>3</sup>
Módulo de Poisson:	0,3

#### 4.4.2. Condiciones de contorno

La base del edificio se simuló totalmente empotrada. Al igual que las uniones entre pilares y forjados. A pesar de que esto no es totalmente cierto se tomaron las previsiones necesarias para lograr uniones lo más rígidas posibles.

Con respecto a las placas de anclaje de la estructura se puede comentar que no están unidas de manera totalmente rígida a la mesa vibratoria, incluso las placas más externas de la estructura en la dirección Y están parcialmente fuera del ámbito de la mesa, lo que genera giro en las bases de los pilares que deberían ser considerados para análisis en los que se requiera un alto nivel de fiabilidad entre modelos numéricos y el modelo experimental, o en su defecto aplicar las medidas de anclaje, recrecimiento o soldaduras necesarias para aumentar el grado de empotramiento de los pilares.

#### 4.5. Análisis dinámico – Estructura 2

En este apartado se explican los tres tipos de análisis dinámicos realizados a la Estructura 2. El primero de ellos es el análisis de frecuencias naturales correspondientes a los modos de vibración de la estructura. Luego se realizó un análisis “steady-state” para conocer el comportamiento de la estructura en el dominio del tiempo. Estos dos primeros ensayos coinciden con los realizados en la Estructura 1 y por ende en los apartados correspondientes a estos ensayos se agregó poca información adicional además de los resultados obtenidos en los mismos.

Sin embargo, el ensayo de barrido de vibraciones realizado en la Estructura no fue posible, ya que no se contó con el tiempo necesario para introducir las funciones de frecuencias una por una en el equipo correspondiente y tampoco era viable la definición

de las funciones en su totalidad por la poca memoria de almacenamiento que ofrece el equipo.

En su lugar la Estructura 2 fue sometida a dos señales de aceleración en la base, una correspondiente al sismo del centro en una sola dirección, y una función de “ruido” a las que, mediante el uso de la transformada rápida de Fourier, se les extrajo las frecuencias naturales que se lograron excitar con estas aceleraciones.

Los resultados del modelo numérico son comparados con los experimentales en el próximo capítulo.

#### 4.5.1. Análisis de frecuencias modales

En este primer análisis se extraen las frecuencias naturales del sistema que compone a la Estructura 2. El objetivo de esta extracción es obtener los datos de frecuencias y modos de vibración que permiten llevar a cabo los análisis modales y de estado estable, ya que estos están basados en superposiciones modales que usan como datos de partida estas frecuencias.

El procedimiento llevado a cabo para este análisis es el mismo que descrito en la Estructura 1, excepto en lo que respecta al rango de frecuencias estudiado.

#### 4.5.2. Obtención de resultados - Postproceso

A diferencia de la obtención de frecuencias naturales de la Estructura 1 en la cual se definió un rango de frecuencias y se obtuvieron los modos de vibración contenidos en el mismo, para la estructura 2, ya que no se conocen las frecuencias exactas a las que se sometió la estructura, se optó por obtener un numero definido de modos de vibración.

En la serie de figuras a continuación se observa la deformada de cada modo de vibración, y en la tabla 26 se resume las frecuencias de cada modo.

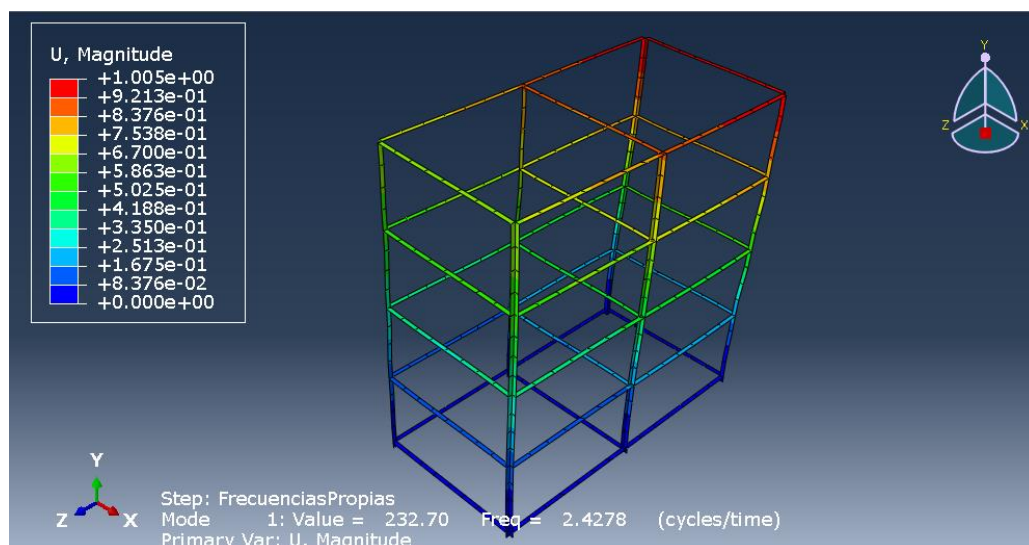


Figura 85. Primer modo de vibración.

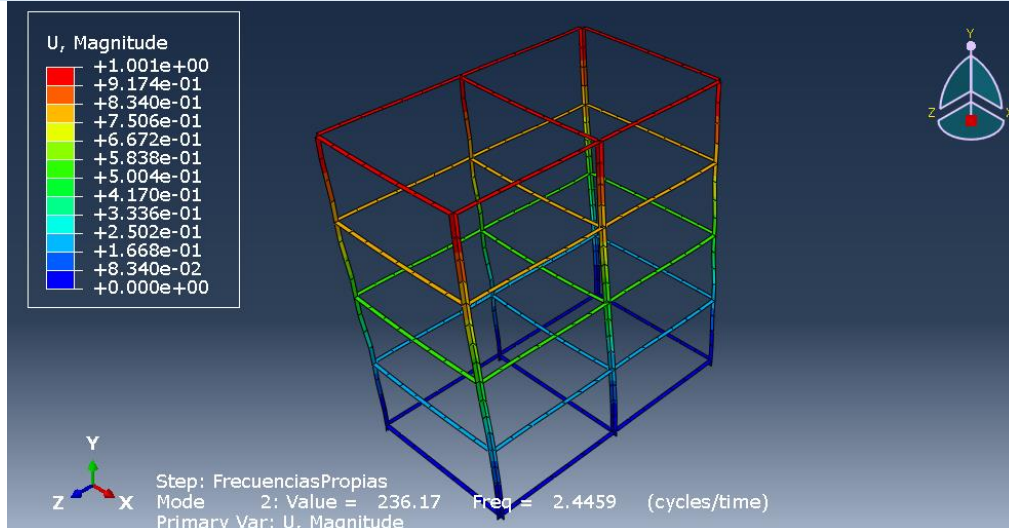


Figura 86. Segundo modo de vibración.

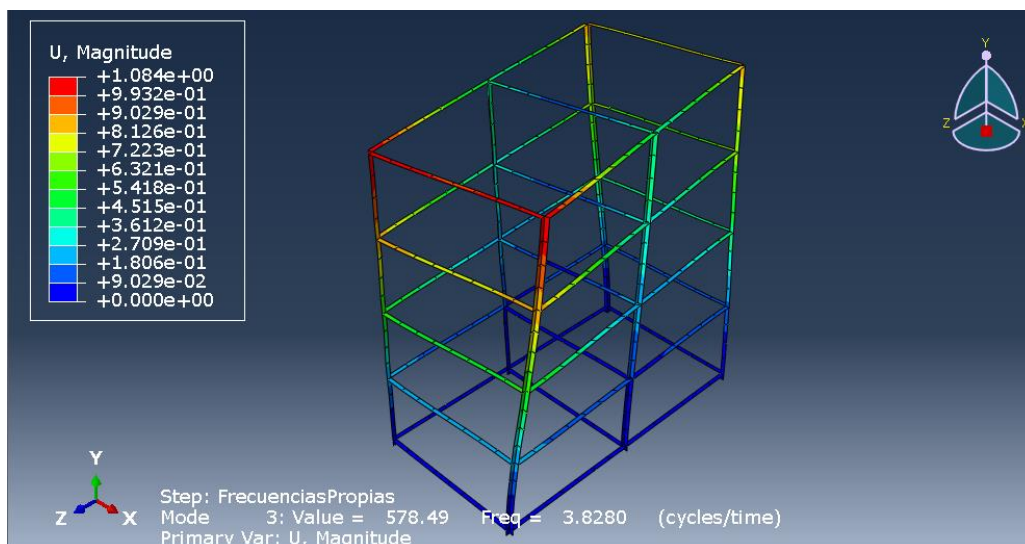


Figura 87. Tercer modo de vibración.

Tabla 26. Tabla resumen frecuencias naturales.

### Estructura 2 - Frecuencias naturales

#### 1er modo:

Frecuencia:	2,428 Hz
Amplitud:	10,01 mm

#### 2do modo:

Frecuencia:	2,446 Hz
Amplitud:	10,01 mm

#### 3er modo:

Frecuencia:	3,828 Hz
Amplitud:	10,85 mm

Cabe comentar que el 3er modo de vibración no se logró detectar en el modelo experimental.

### 4.5.3. Análisis modal dinámico

Al igual que en el caso de la Estructura 1, los acelerómetros no fueron capaces de arrojar resultados de posición y velocidad suficientemente precisos como para ser comparados con los resultados de Abaqus por lo que en esta experiencia solo se comparan los resultados correspondientes a la aceleración.

#### 4.5.3.1. Procedimiento

Al igual que el análisis de frecuencias para ejecutar este análisis también se hizo uso de la opción “linear perturbation” en el módulo de “step”, y luego la casilla de “Modal dynamics”.

Los datos que se introdujeron son el tiempo total del análisis y el intervalo de incremento o discretización del mismo. En este caso el tiempo total es de 10 segundos (acorde a los tiempos medidos experimentalmente) y el valor del incremento es 0,01 segundos para reducir la carga computacional del modelo. El último dato introducido es la fracción de amortiguamiento crítico calculada en el ensayo de vibración libre de la Estructura 2 cuyo valor es igual a 2,515%.

Luego de definir los parámetros del análisis se procedió a definir la carga dinámica que se utilizó en el software para llevar acabo el análisis. Esta carga es una aceleración aplicada a la base y que corresponde al movimiento de la mesa vibratoria durante la ejecución de la función del sismo del centro.

En la figura 88 se muestra la gráfica de aceleración-tiempo aplicada en la base del sistema y que fue importada Abaqus para correr el modelo con la misma aceleración en la base aplicada a la Estructura real.

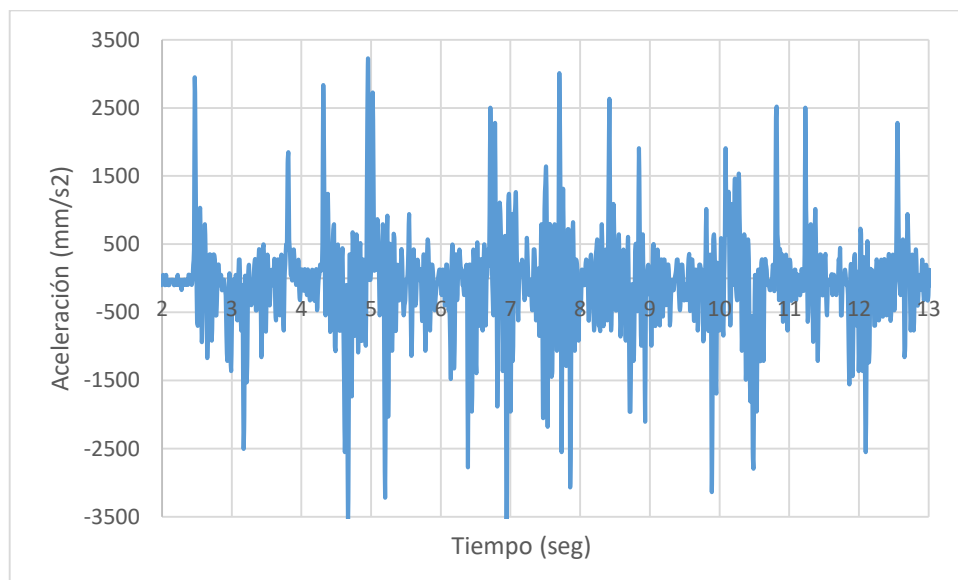


Figura 88. Gráfico de aceleración aplicada en la base del modelo (sismo del centro).

Para importar esta función a Abaqus, se utilizó en el módulo de “Load” la opción de crear condición de contorno y luego de seleccionar aceleración en la base se definió una amplitud con los datos obtenidos por el sensor.

#### 4.5.3.2. Obtención de resultados – Postproceso

Los resultados se obtienen para la señal correspondiente al sismo del centro cuya función está definida por la gráfica mostrada en la figura 88 La comparación de esta aceleración con la medida experimentalmente se muestra en el próximo capítulo.

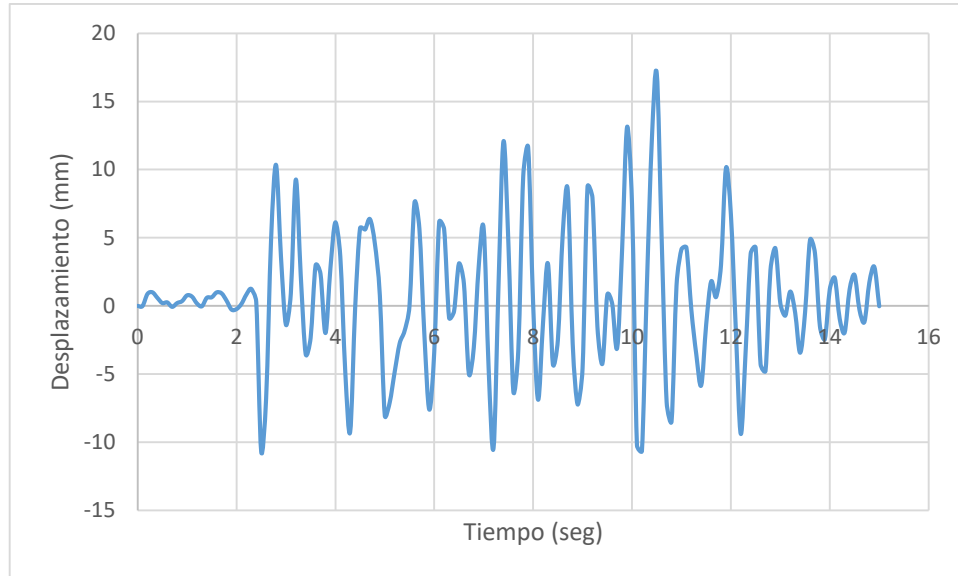


Figura 89. Respuesta de desplazamiento en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 2.

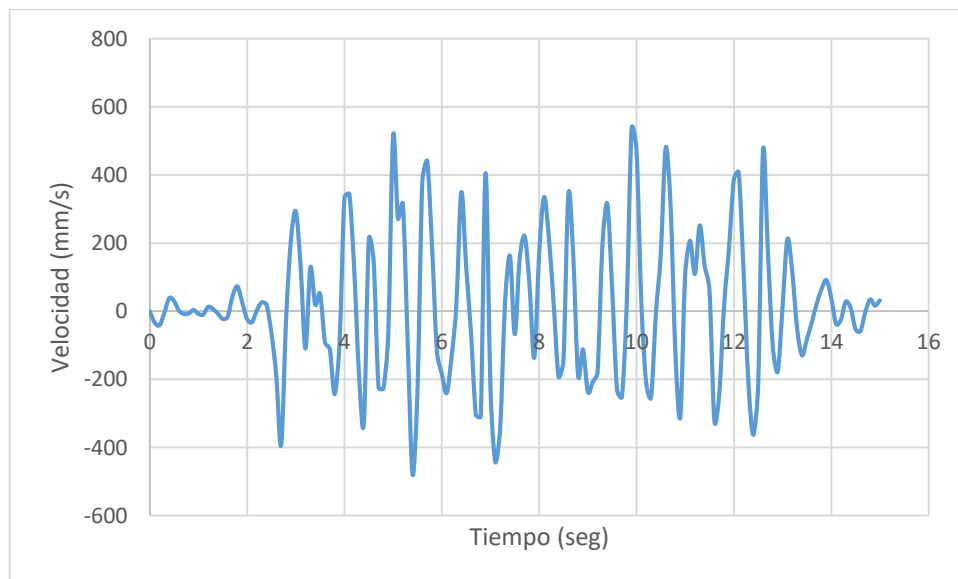


Figura 90. Respuesta de velocidad en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 2.

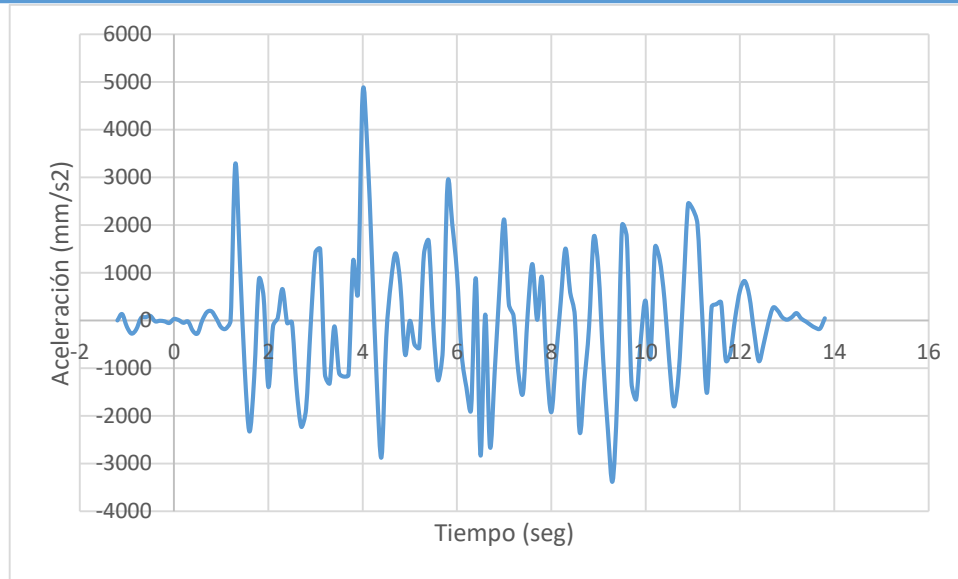


Figura 91. Respuesta de aceleración en el tiempo del modelo numérico de la Estructura 2.

Tabla 27. Valores máximos para el análisis modal de la Estructura 2.

#### Estructura 2 - Análisis modal

##### Sismo del centro

Desplazamiento máximo:	17,1 mm
Velocidad máxima:	535,6 mm/s
Aceleración máxima:	4762,25 mm/s <sup>2</sup>

#### 4.5.4. Análisis en estado estable

El “steady-state analysis” permite obtener la amplitud y la fase del estado estacionario de un sistema debido a una excitación armónica. Generalmente este tipo de análisis se lleva a cabo como un barrido de frecuencias al aplicar una carga con una gama determinada de frecuencias y por registrar la respuesta, aunque esto no fue posible a nivel experimental.

Para realizar este análisis el software necesita dos parámetros importantes, el rango de frecuencias en el que se quiere obtener las frecuencias, en este caso 10hz como se puede ver en la figura 92 y la fracción de amortiguamiento crítico calculada en el ensayo de vibración libre de la Estructura 2.

Edit Step

Name: Steady-state Analysis  
Type: Steady-state dynamics, Modal

Basic Damping

Description:

Nlgeom: Off

Scale: ☒ Logarithmic ☐ Linear

☒ Use eigenfrequencies to subdivide each frequency range

Data

	Lower Frequency	Upper Frequency	Number of Points	Bias
1	0	10	20	3

Basic Damping

Specify damping over ranges of: ☒ Modes ☐ Frequencies

Direct modal ☒ Use direct damping data

Composite modal

Rayleigh

Structural

	Start Mode	End Mode	Critical Damping Fraction
1	1	6	0.02515

Figura 92. Parámetros para el “Steady-state analysis”

Posteriormente se procedió a definir la carga dinámica que se configuró en el software para llevar a cabo el análisis. Esta carga corresponde a los datos de aceleración obtenidos por el sensor ADXL 345 durante la ejecución de la señal definida como “White Noise”. La gráfica de esta función se puede ver en la figura 93.

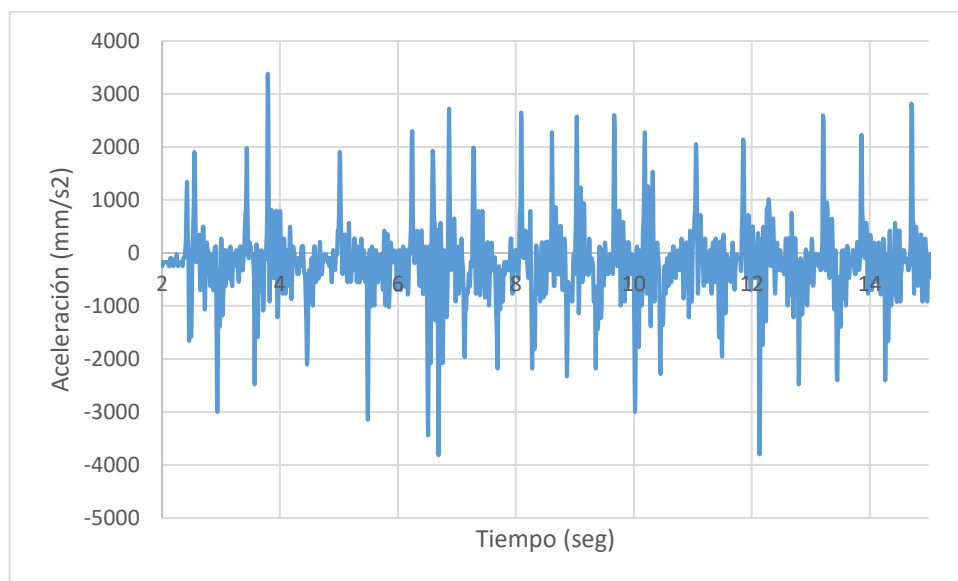


Figura 93. Función de aceleración definida como excitación de entrada para el modelo numérico de la Estructura 1.

Para importar esta función a Abaqus desde Excel se usó el mismo procedimiento que para la definición de la carga dinámica en el análisis modal del presente capítulo.

#### 4.5.4.1. Obtención de resultados – Postproceso

En la serie de graficas a continuación se muestra el espectro de magnitud de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración de la estructura en el dominio de la frecuencia.



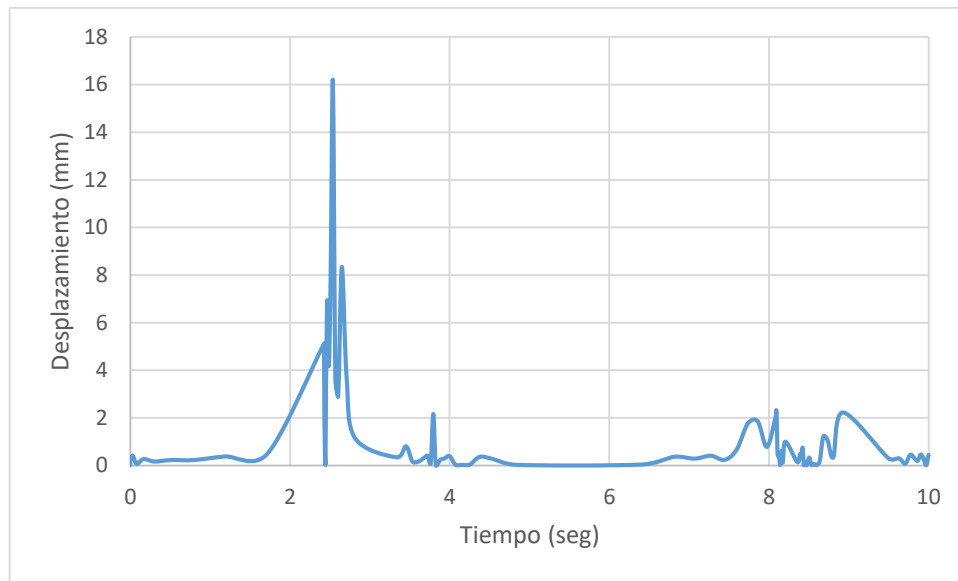


Figura 94. Espectro de respuesta de desplazamiento en el dominio de la frecuencia de la Estructura 2.

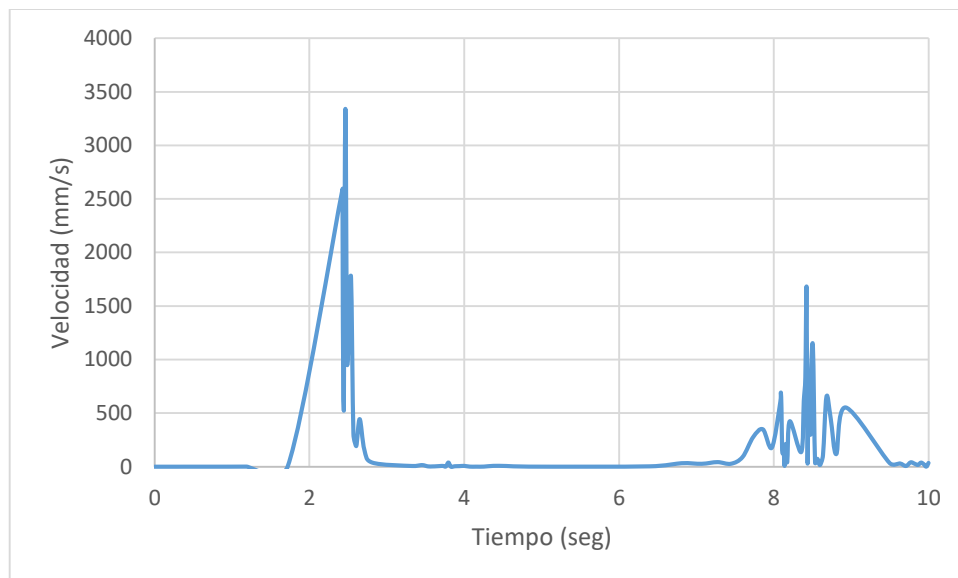


Figura 95. Espectro de respuesta de velocidad en el dominio de la frecuencia de la Estructura 2.

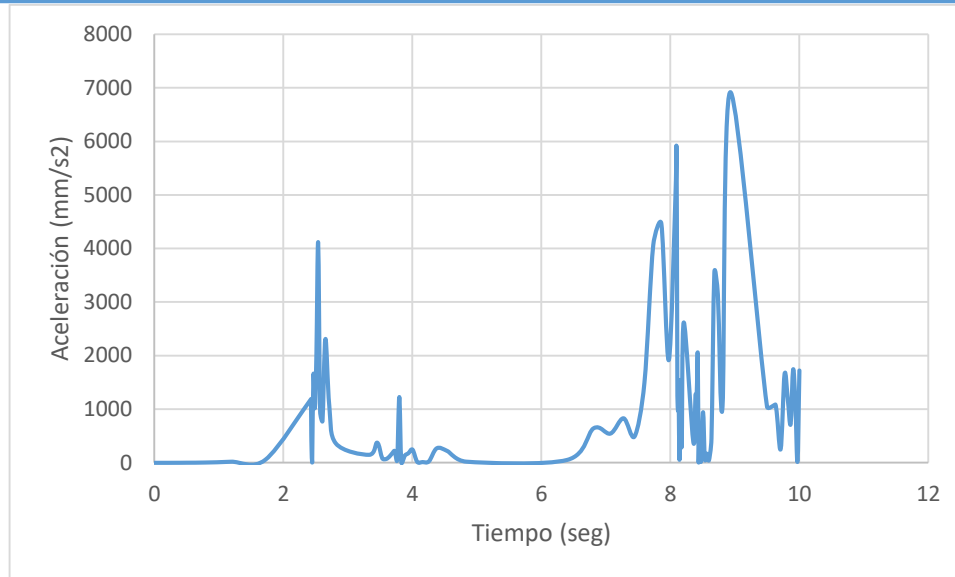


Figura 96. Espectro de respuesta de aceleración en el dominio de la frecuencia de la Estructura 2.

En la tabla 28 se resumen los valores de amplitud máxima y frecuencia de cada una de las gráficas anteriores.

Tabla 28. Resumen Steady-state análisis

**Estructura 2 - Análisis estado estacionario**

<b>Big white noise</b>	<b>Freq (Hz)</b>	<b>Magnitud</b>
Desplazamiento máximo:	2,53882	16,1478 mm
Velocidad máxima:	2,48773	1128,76 mm/s
Aceleración máxima:	8,92927	42577,15 mm/s²

La discusión de estos resultados y su comparativa con los resultados experimentales está planteada en el próximo capítulo.

## 5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS.

En el presente capítulo se comparan y discuten los resultados experimentales y numéricos obtenidos en ambas estructuras. Las comparaciones se plantean de la siguiente manera:

- Análisis de frecuencias propias vs Resultados experimentales tratados mediante FFT.
- Análisis modal vs Espectro de respuesta de aceleraciones
- Análisis en estado estable vs barrido de frecuencias.
- Análisis de estado estacionario vs FFT (ruido blanco)

Es importante comentar que para el 3er ítem el barrido de frecuencias solo se realizó para la Estructura 1, mientras que para la Estructura 2 se comparan los espectros de aceleración en el dominio de la frecuencia y no mediante barrido de frecuencias.

También cabe mencionar que dentro de los resultados experimentales también se plantean comparaciones entre los dos sensores utilizados para la obtención de resultados.

### 5.1. Análisis de frecuencias propias

A continuación se resumen las frecuencias fundamentales obtenidas en apartado, tanto experimentales como la obtenida con el modelo numérico para ambas estructura.

*Tabla 29. Resumen frecuencias naturales Estructura 1.*

#### **Estructura 1 - Frecuencias naturales**

<b>1er modo:</b>	Freq (Hz)	Diferencia (%)
Resultado numérico	5,67	-
<b>ADXL 345</b>		
10 DPS	5,16	9,0
100 DPS	5,27	7,1
480 DPS	5,36	5,5
<b>ADXL 335</b>		
10 DPS	5,16	9,0
20 DPS	5,31	6,3
100 DPS	5,27	7,1
550 DPS	5,41	4,6

*Tabla 30. Resumen frecuencias naturales Estructura 2.*

### **Estructura 2 - Frecuencias naturales**

<b>1er modo:</b>	Freq (Hz)	Error (%)
Resultado numérico	2,43	-
ADXL 345	2,49	2,5
ADXL 335	2,51	3,3
<b>2do modo:</b>		
Resultado numérico	2,44	-
ADXL 345	2,49	2,0
ADXL 335	2,51	2,9

Se observa un alto grado de aproximación para velocidades de muestreo por encima de 2 veces la frecuencia estudiada con una aproximación máxima de 94,5% para el sensor ADXL 345 y de un 95,4% para el ADXL 335, resultando así, más preciso el sensor analógico para esta experiencia. También se puede comentar que el error parece disminuir a medida que se aumenta la velocidad de muestreo del acelerómetro.

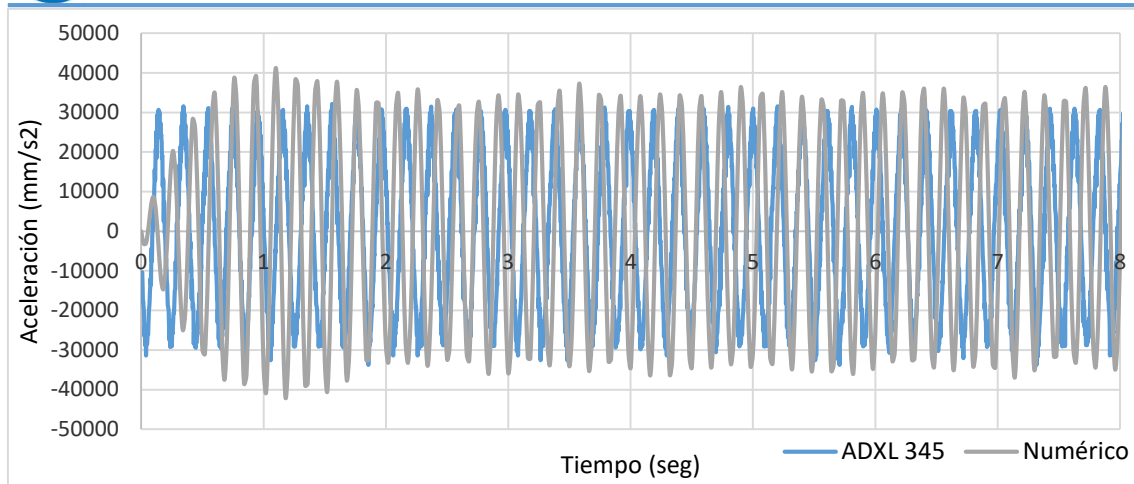
Para las pruebas en la Estructura 2 ocurre lo contrario, el sensor digital tiene una precisión ligeramente mayor que el sensor analógico existiendo una diferencia máxima de tan solo 0,2% entre ambos sensores. Y lo mismo logra observarse comparando ambos resultados experimentales con el valor numérico, existiendo una precisión máxima de 98% y una precisión mínima de 96,7%.

El error entre las frecuencias del modelo y las determinadas experimentalmente podrían atribuirse a la incertidumbre generada por la rigidez de las uniones, el cambio del centro de gravedad del último forjado, afectado por la colocación de los cilindros descritos en el apartado descriptivo de la Estructura 1.

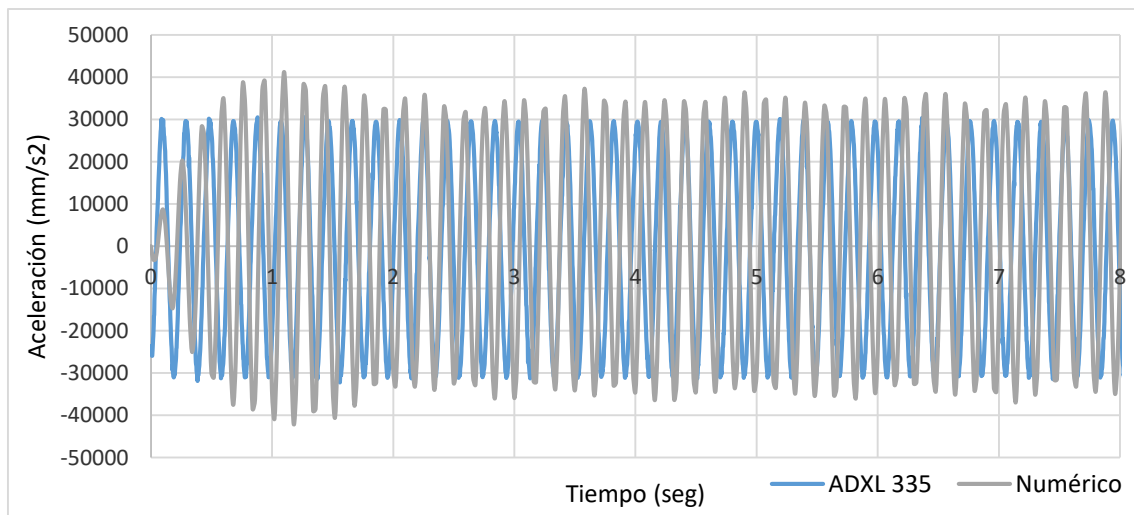
Se puede decir entonces, que la utilización de sensores de bajo coste para la estimación de frecuencias naturales es aceptable.

### **5.2. Análisis modal y espectros de respuesta de aceleración.**

A continuación se presentan las historias de aceleración obtenidas numérica y experimentalmente tanto para la Estructura 1 como par la Estructura 2



*Figura 97. Espectro de repuesta de aceleración numérico vs experimental Estructura 1 (con ADXL 345)*



*Figura 98. Espectro de repuesta de aceleración numérico vs experimental Estructura 1 (con ADXL 335)*

La diferencia de amplitudes entre el resultado experimental y el numérico es resultado de la condición inicial del intervalo de tiempo. En el ensayo experimental después de fijar el actuador en la frecuencia de interés se dejaba vibrar la estructura durante unos instantes, mientras que el modelo numérico la estructura parte del reposo. Luego de los dos segundos, donde las repuestas son estacionarias, las amplitudes coinciden en un 90%, aunque la señal del sensor tiene una frecuencia ligeramente mayor que la del modelo numérico como se puede observar en la figura 98. Para el ADXL 335 los resultados también presentan una frecuencia mayor y una aproximación de amplitudes cercana al 88%.

El pequeño desfase existente puede deberse al dial analógico del generador de ondas, ya que es difícil acertar totalmente la frecuencia deseada en cada ocasión. Cabe comentar que la obtención de la señal de entrada para el software y el ensayo de vibración forzada correspondiente a la frecuencia de resonancia no se realizaron simultáneamente.

Mientras que la diferencia de amplitudes podría atribuirse al amortiguamiento de la estructura.

Sin embargo, puede decirse que el uso de sensores de bajo coste para la obtención de acelerogramas para movimientos armónicos y frecuencias relativamente bajas es aceptable.

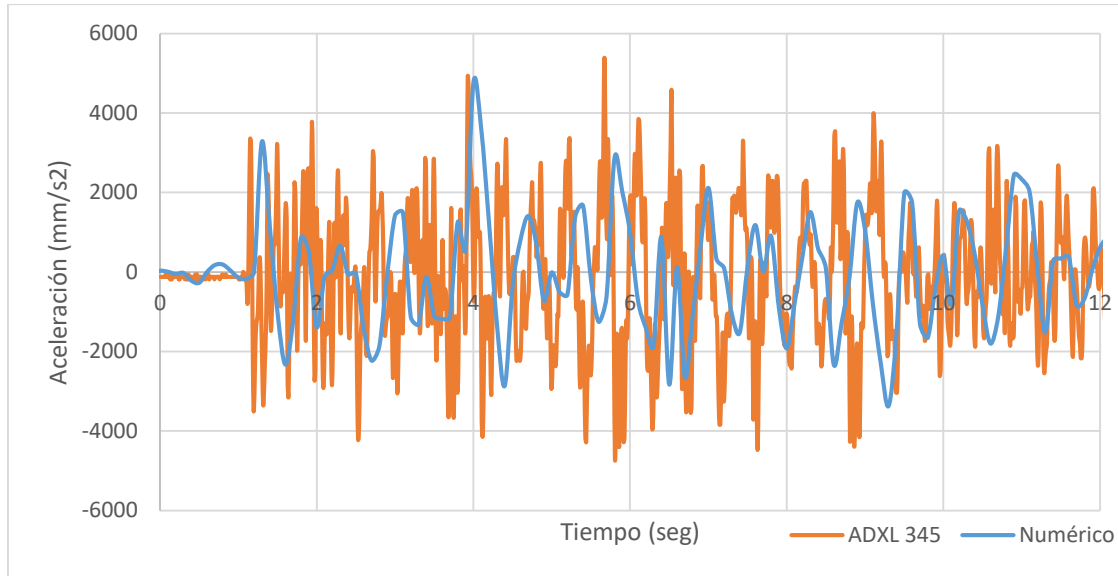


Figura 99. Espectro de respuesta de aceleración numérica vs experimental Estructura 2 (ADXL 345).

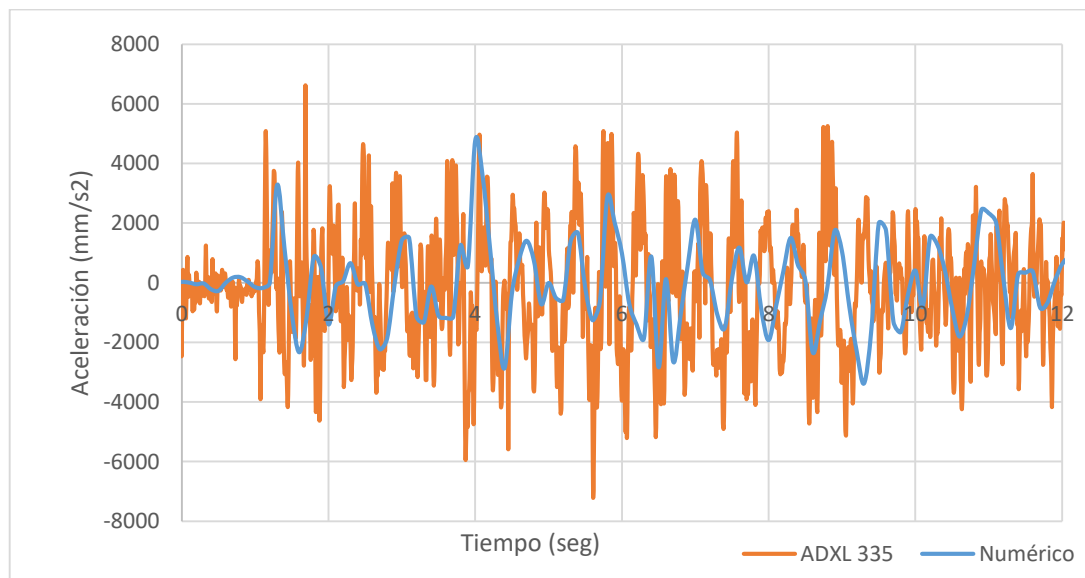
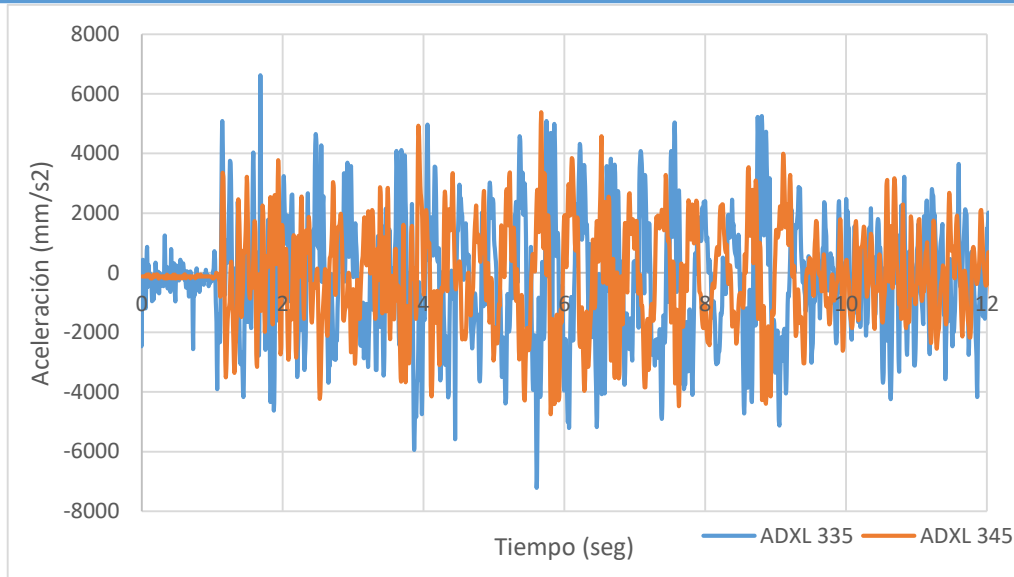


Figura 100. Espectro de respuesta de aceleración numérica vs experimental Estructura 2 (ADXL 335).



*Figura 101. Espectros de repuesta de aceleración experimental.*

La primera característica que salta a la vista es la diferencia de ruido en la señal entre las dos estructuras. La Estructura 1 presenta espectro de aceleraciones mucho más limpios y consistentes que aquellos registrados en la Estructura 2. Las causas de esta distorsión en la segunda estructura no pudieron ser identificadas, se intentó cambiar el juego de cables de ambos acelerómetros y protegerlo del contacto directo de la estructura metálica con cinta aislante sin mejoras apreciables. Entre las posibles causas de esta señal tan ruidosa se puede comentar que la mesa no se desplaza de una forma totalmente suave, es decir existe una pequeña vibración al cambiar de posición.

Sin embargo, a pesar de usar esta señal como dato de entrada en el software se observa un espectro de repuesta sin ruido y que de cierta manera sigue el comportamiento definido por el acelerómetro, como se puede observar en la figura 99 y 100.

Incluso comparando las señales obtenidas en ambos acelerómetros se observa que no existe una coincidencia clara, aunque el comportamiento de las señales sea similar.

Puede afirmarse que para este ensayo, los datos obtenidos no son aceptables. Los acelerogramas presentan una gran cantidad de ruido que no hace posible la recrear de manera certera los espectros de interés. A pesar de ello resulta interesante observar que para el estudio de repuestas en el dominio de la frecuencia los resultados pueden considerarse aceptables.

### 5.3. Análisis en régimen estacionario vs Barrido de frecuencias.

En la tabla mostrada a continuación se contrastan los resultados de análisis de estado estable vs el ensayo de barrido de frecuencias de la Estructura 1 para las diferentes velocidades de muestreo utilizadas en la primera parte de la campaña experimental:



Tabla 31. Barrido de frecuencias resultado numérico Estructura 1.

**Estructura 1 - Repuesta maxima**

1er modo:	Aceleración máxima (mm/s <sup>2</sup> )	Error (%)
Resultado numérico	27675,15	0
<b>ADXL 345</b>		
freq x2	33443,18	20,8
Freq x4	35003,86	26,5
Freq x8	34530,68	24,8
480 Hz	33368,86	20,6
<b>ADXL 335</b>		
freq x2	27808,20	0,5
Freq x4	27544,29	0,5
Freq x8	27544,29	0,5
550 HZ	30589,01	10,5

Los espectros de aceleración en el dominio de la frecuencia utilizados para extraer esta tabla pueden ser consultados en las figuras 102, 103 y 104, que se repiten a continuación por comodidad.

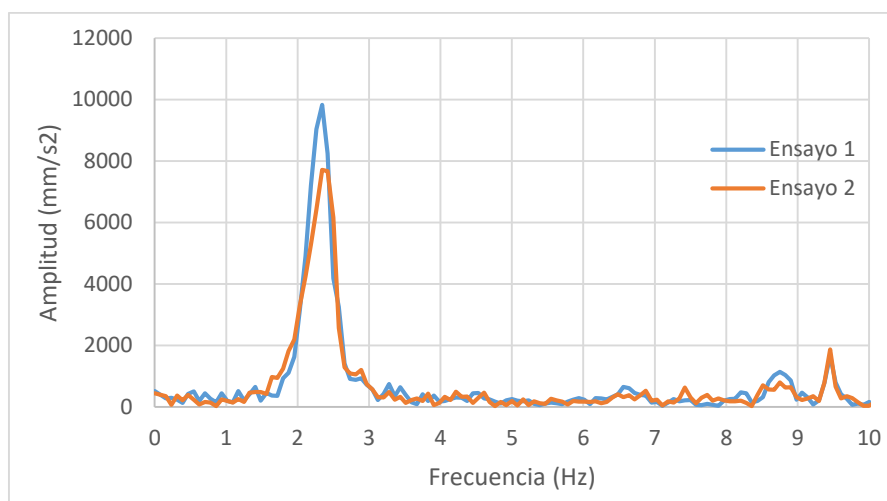


Figura 102. Espectro de frecuencia de la Estructura 2.

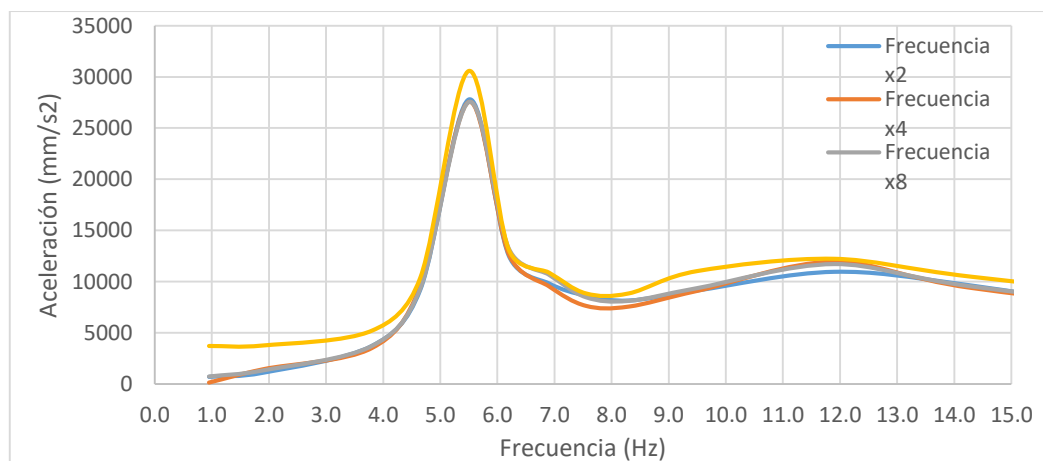
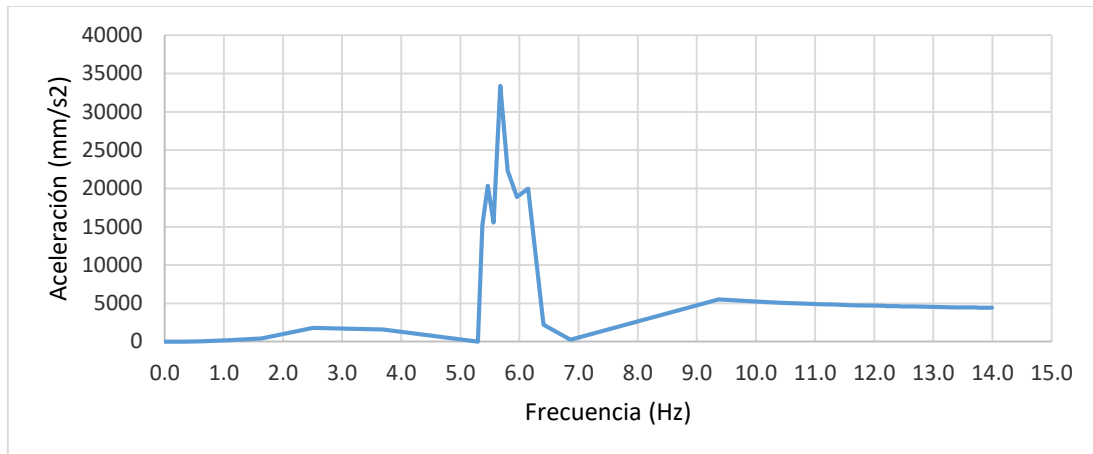


Figura 103. Resultado del barrido de frecuencias en la Estructura 1 usando el acelerómetro ADXL 335



*Figura 104. Espectro de respuesta de aceleración en el dominio de la frecuencia de la Estructura 1.*

Como puede apreciarse las gráficas antes mencionadas los espectros tienen formas muy diferentes, es por esta razón que los resultados de este subcapítulo son presentados en la tabla 31, en donde se comparan los valores máximos para el primer modo de vibración, que fue el único detectado en el rango de frecuencia de estudio.

Esta diferencia de formas se explica por la manera en la que se construyeron las gráficas. En el modelo numérico se introdujo una señal continua, donde existía el abanico de frecuencias descrito en la tabla 23, mientras que para el modelo experimental la metodología fue medir la respuesta de la estructura durante 10 segundos en las frecuencias enumeradas en las tablas 15 y 16, y extraer los valores máximos de aceleración para cada frecuencia.

Es destacable la aproximación y consistencia de los resultados obtenidos con el ADXL 335 en la determinación de la aceleración, con tan solo un 0,5% de error con respecto al resultado del modelo numérico. Puede apreciarse que al usar el sensor con su máxima velocidad de muestreo hay un aumento del error 20 veces mayor que para velocidades de muestreo menores.

Con respecto al ADXL 345 la media de errores es del 23,18%, mucho mayor que el 0,5% de error logrado con el sensor analógico, no obstante el error parece tener una dispersión aleatoria sin tendencia a disminuir o aumentar con la velocidad de muestreo, por lo que sería necesario realizar más pruebas para determinar esta tendencia o identificar otros factores que puedan influir en la calidad de las lecturas.

Para este apartado puede concluirse que la utilización de sensores para determinar amplitudes máximas es aceptable.

#### 5.4. Análisis en régimen estacionario vs Repuesta en el dominio de la frecuencia

En este último apartado de comparación de resultados se contrastan los espectros de aclaración en el dominio de la frecuencia obtenidos para la Estructura 2 bajo una carga con una amplia gama de frecuencias definida como “Ruido Blanco”.

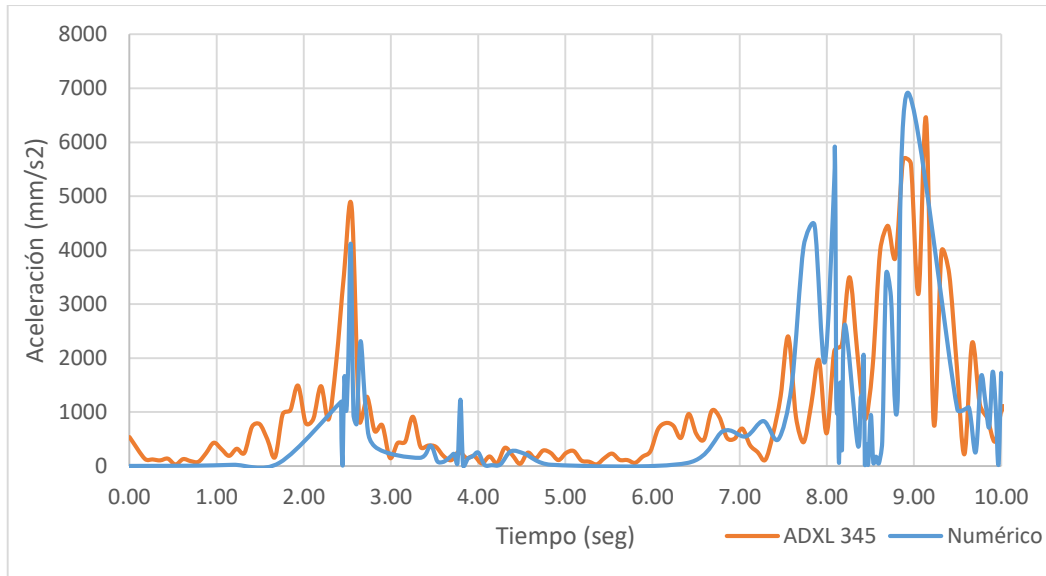


Figura 105. Espectro de aceleración en el dominio de la frecuencia (ADXL 345).

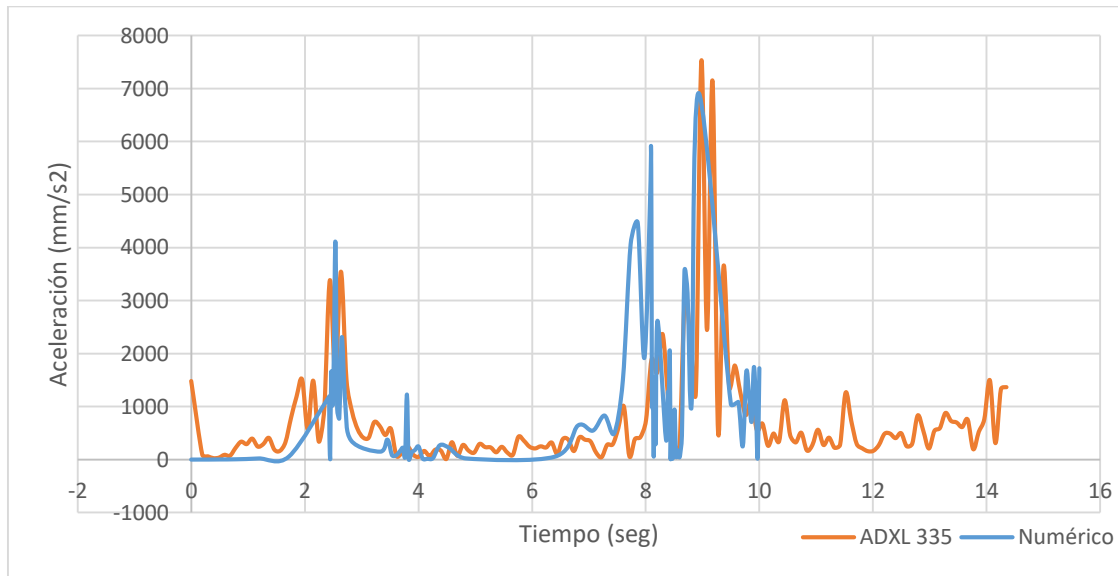


Figura 106. Espectro de aceleración en el dominio de la frecuencia (ADXL 335).

El primer punto a discutir es que, ninguno de los dos espectros de repuesta construidos con los datos de los sensores, no se detectan picos cercanos los 3,6 Hz. Frecuencia correspondiente a al 3er modo de vibración, que para el caso de la Estructura 2 es un modo torsional.

La segunda característica destacable es el ruido en el espectro, es decir la gran cantidad de picos que presentan las gráficas, sobre todo en el rango de 7,5 a 10 Hz, donde se observa una gran concentración de picos que dificultan la identificación de los respectivos modos de vibración. Sin embargo, puede observarse que existe una gran similitud entre la solución numérica y la registrada experimentalmente, excepto entre los 7,5 y 8 Hz donde la línea del modelo digital presenta un pico muy superior al obtenido con los sensores.

De esta comparación de resultados se puede concluir que los sensores funcionan mejor detectando modos de vibración traslacionales que modos de vibración torsionales. Para este ensayo se observa dificultad también para determinar los valores de frecuencias de modos de vibración complejos, aunque la gran cantidad de picos presentados, tanto en la gráfica del modelo digital como del modelo físico, puede deberse al ruido de la señal de entrada. Sin embargo, es importante comentar que la dificultad para detectar estos modos de vibraciones complejos, e incluso torsionales, puede ser causado por dos razones. La primera es que las mediciones utilizadas en este estudio provienen de un solo sensor por ensayo y ubicado en la misma posición para todos los ensayos.

Sería conveniente identificar y minimizar la fuente de ruido y repetir el ensayo comparando con los resultados del presente documento para determinar si existe una disminución de estos picos y definir si se presentan de manera más clara las frecuencias de estos modos. Es importante comentar que durante la realización de esta tesis no se usaron filtros ni sistemas de tratamiento de la señal.

De esta misma manera, resultaría útil realizar un estudio modal de la estructura utilizando una mayor cantidad de sensores para determinar la aproximación que se puede lograr en la identificación de modos de vibración no traslacionales.

## 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se plantean conclusiones referentes a distintos aspectos abordados durante este estudio, como son:

- Conclusiones referentes al microcontrolador y los sensores utilizados.
- Conclusiones referentes a la modelización numérica.
- Conclusiones referentes a las estructuras ensayadas.

Y por último se desarrolla un apartado donde se plantean futuras líneas de investigación y una serie de recomendaciones según las experiencias adquiridas durante el desarrollo de este trabajo.

### 6.1. Conclusiones referentes al microcontrolador y a los sensores de bajo coste como instrumentos de investigación.

En lo referente al microcontrolador Arduino DUE, quedo demostrado que es lo suficientemente versátil y potente para usarse como un sistema de adquisición de datos en estudios de vibraciones de bajas frecuencias. Además se comprobó su capacidad para manejar datos tanto de origen digital como de origen analógico y con velocidades de muestreo que permiten el estudio de una amplia gama de estructuras.

Entre otras ventajas destacables en la utilización de este tipo de herramientas, se pueden mencionar su bajo coste y la gran cantidad de material, información y proyectos a los que se tiene libre acceso. Lo que le confiere un gran potencial como herramienta de aprendizaje, experimentación y prototipado.

En cuanto a los sensores se puede comentar que, la dificultad para inferir la posición y velocidad de una estructura a partir del registro de aceleraciones limita su utilización en estudios de vibraciones de estructuras civiles, ya que estos datos son, generalmente, relevantes en este tipo de estudios.

Por otra parte, demostraron ser muy fiables para determinar la frecuencia fundamental de las estructuras, lo que permitiría su aplicación en estudios de daños a partir de las variaciones de esta frecuencia.

El ADXL 335 (sensor analógico), logro mayores índices de aproximación a la solución numérica alcanzando errores de tan solo 0,5%, mientras que el ADXL 345 (sensor digital) alcanzo errores de hasta 25%.

Otra diferencia destacable entre ambos sensores fue la consistencia en la velocidad de muestreo. El ADXL 335 funciono de manera estable y sin pérdida de datos a una frecuencia máxima de 550 Hz, a diferencia del ADXL 345 que, a pesar de tener una mayor velocidad de transferencia de datos según su hoja técnica, tuvo que configurarse a 480 Hz para evitar la pérdida de datos.

En general, el uso de estas herramientas para estudios dinámicos de sistemas estructurales en el rango de frecuencias esperado en ingeniería civil es aceptable, y la fiabilidad de los resultados dependerá del entendimiento de las limitaciones de los equipos.

## 6.2. Conclusiones referentes a la modelización numérica

La modelización en elementos finitos mediante Abaqus, logro recrear la respuesta de las estructuras con un alto grado de aproximación, probando ser una importante herramienta para la validación de ensayos y experimentos.

Estimar de manera precisa la geometría y las masas de las estructuras fue clave para obtener datos que coincidieran con los reales. El modelo digital demostró ser particularmente sensible a estos factores, incluso más que a la rigidez de las uniones.

Así mismo la adecuada elección de los tipos de elementos para la simulación de los elementos reales resulta crucial para obtener resultados fiables, sobre todo si se necesitan datos de esfuerzos.

## 6.3. Conclusiones referentes a las estructuras ensayadas.

De todos los parámetros modales calculados y comparados en este estudio se observa que el que genera mayor aproximación es el de las frecuencias naturales de los sistemas, sobre todo del primer modo o modo de vibración fundamental, que alcanza una aproximación de hasta 95% para la primera estructura y de 99,1% en la segunda estructura, incluso con una señal mucho más ruidosa que la registrada en la primera estructura.

También para registrar aceleraciones máximas los resultados mostraron aproximaciones de hasta un 98% con las obtenidas en modelo numérico, sin embargo, los resultados no son tan positivos para las historias de aceleración de la Estructura 2, que por factores que no lograron ser identificados ambos sensores registraron señales llenas de ruido.

La determinación del amortiguamiento crítico de las estructuras no pareció ser sensible a este ruido, siendo bastante constante en los diferentes ensayos de vibración libre que se realizaron.

Así mismo se comprobó que aplicar análisis de Fourier a los datos obtenidos y transformar las repuestas a espectros en el dominio de la frecuencia, los resultados son menos sensibles a las distorsiones de la señal analizada.

Considerando lo antes expuesto y lo descrito en el capítulo 5, puede concluirse que la aproximación entre el modelo numérico y el experimental es suficiente para validar los resultados obtenidos en esta investigación.

## 6.4. Recomendaciones

Para obtener una buena aproximación entre la repuesta numérica y la experimental es fundamental reducir las incertidumbres. Conocer de manera exacta los materiales que conforma el sistema, tomar las medidas necesarias para que las uniones tengan el comportamiento deseado y definir de manera precisa la geometría y las masas de las mismas es vital para lograr una buena simulación.

Con respecto al uso de estas herramientas como sistema de adquisición de datos en el laboratorio:

- Se recomienda que siempre que se tomen medidas la conexión entre el sensor y la placa se hagan de manera directa y no a través de las “breadboards”, ya que es más difícil garantizar un voltaje estable.
- Las conexiones de los cables al acelerómetro deben estar soldadas de manera correcta evitando el contacto con pines adyacentes, y todos los elementos del circuito, como resistencias y capacitores, también deben ir soldados y protegidos con cinta aislante.
- Es recomendable que ni el sensor ni la placa estén en contacto con superficies metálicas o cerca de campos magnéticos.
- La resolución y velocidad de muestreo de la placa y el sensor deben conocerse y no se deben sobrepasar o la calidad de los datos puede no ser suficiente.
- Usar filtros pasabajos, capacitores y/o resistencias para estabilizar el voltaje y reducir el ruido podría incrementar significativamente la calidad de la señal.
- Se recomienda calibrar los sensores y tomar varias muestras por ensayo.
- Cuando se usen acelerómetros analógicos aumentar, cuando sea posible, la resolución del ADC, para conseguir resultados más exactos y precisos.

## 6.5. Futuras líneas de investigación

- Plantear un set-up de Arduino como sistema de adquisición de datos incluyendo filtros de señal y capacitores para mejorar la calidad del voltaje del circuito de lectura
- Plantear la utilización de Arduino como sistema de adquisición de datos de sensores de gama media y alta.
- Llevar a cabo análisis modales experimentales usando un conjunto de sensores como sensores de ultrasonido o infrarojos para medir distancia, acelerómetros para las aceleraciones y giroscopios para giros en vigas, forjados y pilares.
- Usar herramientas de código abierto y bajo coste para crear redes de monitorización que permitan llevar a cabo análisis modales operacionales de estructuras reales.
- Determinación de daño de estructuras estudiando las variaciones del amortiguamiento usando sensores de bajo coste.



## 7. Referencias

- Andrejasic, M. (2008) Mems accelerometers, Seminar. Liubliana, Eslovenia. Uniersidad de Liubliana.
- Barbat, A. H. & Canet, J. M. (1994) ESTRUCTURAS SOMETIDAS A ACCIONES SISMICAS, Cálculo por Ordenador. Ediciones CIMNE. Barcelona.
- Beeby, S. G., Ensell, M., Kraft, N., White, B. (2004) MEMS mechanical sensors Artech house inc., Estados Unidos.
- Chopra, A. K. (2014). DINAMICA DE ESTRUCTURAS, cuarta edición, Ediciones Pearson. Berkeley, Estados Unidos. Universidad de California.
- Clough, R. W. & Penzien, J. (1995). DYNAMICS OF STRUCTURES, Third edition, Berkeley, Estados Unidos. Universidad de California.
- Consuegra F., Santos C.(2005) Análisis de vibraciones en la evaluación global y local de puentes como instrumento para su reforzamiento estructural. Revista de la construcción. Vol. 14
- Del Rio, P. (2015) Creación y Validación de un Modelo de Elementos Finitos de una Viga Mediante Análisis Modal. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid.
- Ewins D. J. (2000) *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press Ltd., Segunda Edición.
- Lázaro, L. (2015) Ensayo a Escala de Edificio de Dos Alturas Sometido a Desplazamientos Horizontales. Barcelona, España. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Lui, G. R. & Quek, S. S. (2013) The Finite Element Method. Oxford, Estados Unidos.
- Lyshevski, S. E. (2002) Mems and Nems: systems, devices and structures (CRC Press LLC, USA, Loiusville, Estados Unidos.
- Martin, A. (2017) Tesis de Investigación: "Determination Damage Degree Structure From Natural Frequencies Variaton. Barcelona, España. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Nur Kudu, F., Ucak, S. Gokhan, O., Termerl, T. & Bayraktar, A. (2015) Estimation of Damping Ratios of Steel Structures by Operational Modal Analysis Method. Liubliana, Eslovenia. Universidad de Liubliana.
- Oller, S., & Car, E. (1999). Respuesta Dinámica De Las Estructuras. Barcelona, España. Universidad Politecnica de Cataluña
- Paz, M. (1992). DINAMICA ESTRUCTURAL:Teoría y Cálculo. Editorial Reverté. Kentucky, Estados Unidos.
- Pearce J. (2014) Open-Source Lab. How to Build Your Own Hardware adn Reduce Research Cost. Primera edición. Elseiver. USA-UK-Netherlands.

Ramos, L. F., Aguilar, Lourenzo, P. B. & Moreira, S. (2012) Dynamic Structural Health monitoring of Saint Torcato Church, Guimaraes, Portugal. Universidad de Minho.

Rodríguez M, (2005) Análisis Modal Operacional. Sevilla, España. Universidad de Sevilla.

Tejada, A. M. (2011) Análisis Dinámico de Estructuras en el Dominio de la Frecuencia. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid.

Zhu, H., Li, L. He, X. (2011) Damage detection method for shear buildings using the changes in the first mode shapes slopes. Hong Kong, China.

## Webs y enlaces:

Simulia Abaqus:

<https://www.3ds.com/es>

Arduino:

<http://arduino.org/>

RaspberryPi:

<https://www.raspberrypi.org/>

Sinumerik 805 Software Version 2:

<https://support.industry.siemens.com/cs/document/22286551/sinumerik-805-software-version-2-installation-instructions?lc=en-DE&pnid=14641>

Ch Robotics:

<http://www.chrobotics.com/>

ADXL 345 Datasheet:

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/ADXL345.pdf>

ADXL 335 Datasheet:

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/adxl335.pdf>

AT91SAM3X8E (procesador del Arduino DUE) Datasheet:

[http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf)